

La mecánica de las bóvedas tabicadas en su contexto histórico: la aportación de los Guastavino

Santiago Huerta

Las bóvedas tabicadas son bóvedas de fábrica, hechas con ladrillo y mortero. Su singularidad proviene de su construcción: los ladrillos se disponen de plano formando una o varias hojas (la primera, al menos, se recibe con yeso) y se ejecutan sin cimbra. Los ladrillos se van disponiendo cerrando arcos o anillos sucesivos. Mientras se cierran la sujeción de los ladrillos se consigue por la adhesión del mortero de fraguado rápido con los arcos o anillos previos ya terminados, o con los muros de borde. No hay cimbras pero sí se emplean «formas» (cerchas ligeras), camones o cintreles diversos para controlar la forma de la bóveda, en particular cuando ésta adquiere ciertas dimensiones o se desea una ejecución esmerada.

La técnica es en todo análoga a la construcción sin cimbra de bóvedas de rosca de ladrillo. En este último caso, cuando se emplea mortero de cal, de más lento fraguado, la adhesión se suplementa inclinando las juntas de los ladrillos. Las marcadas semejanzas en cuanto a los procesos de cierre de bóvedas no pueden ser casuales y parece muy probable que la técnica tabicada tenga su origen en la construcción sin cimbra de rosca de ladrillo.

Las bóvedas tabicadas se construyen con espesores muy pequeños. Lo normal es que sean de dos hojas (unos 10 cm en total, incluyendo la capa intermedia de mortero y los recubrimientos), pero también se encuentran de una hoja (unos 5 cm). Las esbelteces, relación entre el radio de curvatura y la luz, con frecuencia andan sobre 100, pero las hay muchos más esbeltas.

Hasta mediados del siglo XIX, las bóvedas tabicadas se han empleado para distintos tipos de elementos:

- para cubrir las naves de las iglesias. En este caso, sólo deben soportar su propio peso y la carga ocasional propia del mantenimiento. En general van protegidas por una techumbre superior de madera.

- para formar forjados
- para construir escaleras.

A partir de mediados del siglo XIX se empezaron a emplear en España y Francia para la construcción de cubiertas y suelos de edificios industriales, principalmente de fábricas textiles. El empleo del cemento Portland en el doblado permitió emplearlas como cubierta, sin necesidad de una techumbre superior o especiales precauciones (doble cámara, etc.). En la Cataluña de finales del siglo XIX y principios del XX se convirtieron casi en un símbolo nacional. Rafael Guastavino las exportó a América, a finales del siglo XIX, y, allí les confirió una dignidad que probablemente nunca habían tenido. Las «bóvedas de Guastavino» se construyeron en varios de los edificios más importantes de los años 1890–1900.¹

La técnica de la construcción tabicada se conoce bastante bien y puede consultarse a este respecto la *Bibliografía seleccionada* que se incluye al final de este libro. No ocurre lo mismo en lo referente a su funcionamiento estructural. A partir del siglo XVIII han sido miradas con desconfianza y se ha aludido a su falta de seguridad y durabilidad. En particular, se ha considerado que las bóvedas tabicadas tienen un funcionamiento estructural esencialmente distinto al de las bóvedas de piedra o de rosca de ladrillo. Guastavino las encuadró dentro de las estructuras «cohesivas», en contraposición a las estructuras doveladas por «gravidad». Se las ha llegado a calificar de «imposibles de calcular», y por ello algunas han sido demolidas y sustituidas por otras estructuras más convencionales.

El objetivo principal de este artículo es devolver a las bóvedas tabicadas a su sitio: las bóvedas tabicadas son bóvedas de fábrica y, por tanto, esencialmente iguales a las bóvedas de piedra o rosca de ladrillo. Como ellas no resisten bien las tracciones, empujan y se agrie-

tan. No son monolíticas, ni cohesivas. Pueden y deben calcularse con las mismas herramientas que cualquier bóveda de fábrica. No son menos duraderas si reciben el necesario mantenimiento.

No obstante, sus peculiares características restringen su uso. Así, el hecho de ser más delgadas impone ciertas limitaciones en cuanto a la acción de sobrecargas accidentales. Por otra parte, su propia estructura laminar limita de hecho las deformaciones por apertura de grietas: la bóveda tiende a «deshojarse» y esto reduce su resistencia. Finalmente, cuando están hechas con mortero de yeso soportan mal el agua y deben estar protegidas por una techumbre de madera o por un buen recubrimiento de mortero de cemento.

Este artículo podría terminar aquí, pero como las ideas que se exponen contradicen las opiniones habituales dedicaré los siguientes apartados a justificar los asertos anteriores. La exposición seguirá un orden cronológico porque, en este caso, como en tantos otros, la historia permite explicar la situación actual de desconcierto y desconfianza hacia estas estructuras.

Antes de seguir conviene hacer una última precisión. El estudioso actual de las bóvedas de fábrica se enfrenta a una limitación seria: nunca ha proyectado, construido o visto construir una. La práctica de la construcción abovedada le es ajena por completo. Las estructuras que se enseñan en las universidades corresponden a otros tipos. No se mencionan las estructuras abovedadas, ni su forma de cálculo. Somos ignorantes, pues, tanto en la práctica como en la teoría. Por esto, reviste especial importancia leer a los antiguos maestros e interrogar de manera crítica a los propios edificios.

La tradición tabicada en España ss. XVI-XVIII. Fray Lorenzo de San Nicolás

Como se ha dicho, la desconfianza y determinadas ideas preconcebidas acompañan desde el siglo XVIII a las bóvedas tabicadas. Resulta interesante comprobar que esto no ha sido siempre así y que, de hecho, en los tratados y escritos anteriores que hablan de la construcción tabicada no se hace ninguna diferencia con las otras bóvedas de fábrica.

Los primeros documentos sobre este tipo de construcción son de los siglos XIV y XV. En el siglo XVI ya eran empleadas de forma habitual (Marías, 1991). Se valoraba su facilidad de ejecución, su resistencia y, sobre todo, su menor peso que permitía reducir considerablemente los muros y machones de contrarresto. Particularmente revelador resulta el siguiente texto, fechado en 1622, en el que Melchor Callejón maestro de arquitectura de Granada pondera las ventajas de las bóvedas tabicadas en relación con las de piedra a la hora de terminar una de las bóvedas del Palacio de Carlos V (Rosenthal, 1988):

Sólo los arcos mayores fuesen de cantería y las lunetas de los entremedios a lo ligero y la tabla de la bóveda de tabiques doblados con ladrillos gruesos hechos a propósito, en la forma que los templos modernos se fabrican, que tienen fortaleza y poca costa, ... *y las paredes en que restriban trabajan menos*, por cuya causa las de este edificio se fundaron, no con la fortaleza que se requiere para ser todo de cantería, de que podría resultar vicio en la obra y aún riesgo, y mucha mayor costa.

Nótese la frase señalada en cursiva: las bóvedas tabicadas empujan menos que las corrientes, de modo que precisan estribos menores, pero empujan. Las dimensiones de los muros y estribos previstos para una bóveda tabicada son insuficientes para una bóveda de piedra, pero los estribos son necesarios.

El texto más relevante en cuanto a la construcción y mecánica de las bóvedas tabicadas es el tratado de arquitectura de Fray Lorenzo de San Nicolás (1639). Fray Lorenzo describe la construcción de los tipos fundamentales de bóveda (de cañón, arista, media naranja, rincón de claustro, etc.) en piedra, rosca de ladrillo y tabicada. No se hacen distinciones en cuanto a la mayor o menor bondad de un material u otro. Fray Lorenzo, al parecer, considera los tres procedimientos igualmente buenos constructivamente y deja al arquitecto la elección en cada caso. Además, resulta muy revelador que, independientemente del material, es preciso dotar la bóveda de un trasdosado de refuerzo que permita transmitir los empujes hacia los estribos. Así, indica la necesidad de macizar el trasdós en los arranques hasta el primer tercio de la altura de la bóveda y de disponer muros o tabiques de estribo, que llama «lengüetas», hasta alcanzar el segundo tercio. Fray Lorenzo es explícito en cuanto al papel estructural de estos dispositivos:

... y así como vayas tabicando, la iras doblando y macizando las embecaduras hasta el primer tercio, y esto ha de ser en todas las bobedas, echando sus lengüetas a trechos, que levantan el otro tercio, para que así reciban todo el empujo o peso de la bobeda.

Los rellenos y lengüetas pueden servir para soportar un suelo horizontal pero, además, tienen una función estructural: permiten que la bóveda resista sobrecargas asimétricas o cargas móviles. Se disponen también en las bóvedas de cubierta.

Fray Lorenzo se ocupa asimismo del cálculo de los estribos. Da para ello una serie de reglas que se refieren al tipo más habitual en la época: iglesia de una nave con bóveda de cañón de medio punto y lunetos. Procede de forma sistemática, asignando las dimensiones en función del material de la bóveda y considerando dos tipos posibles de estribo: muro continuo o muro con contra-

material	muro de sección constante	muro + contrafuertes
piedra	L/3	L/6 \geq L/3
rosca de ladrillo	L/4	L/7 L/3
tabicada	L/5	L/8 L/4

Tabla 1. Estribos para bóvedas de cañón según Fray Lorenzo de San Nicolás (Huerta, 1990)

fuertes. La exposición es discursiva pero puede resumirse en la tabla 1.

Los antiguos constructores identificaban el empuje de la bóveda con el estribo necesario para resistirlo. La bóveda tabicada empuja menos que la de rosca de ladrillo o piedra, pero empuja, y requiere un sistema de contrarresto.

Finalmente, Fray Lorenzo trata en otro capítulo la construcción de escaleras de fábrica y, de nuevo, describe la construcción con piedra, rosca de ladrillo y tabicada. Se ocupa tanto del tipo más habitual de tramos «a montacaballo» como el de las escaleras de caracol. Es evidente que Fray Lorenzo está recogiendo en su tratado una tradición constructiva tabicada ya establecida. Él mismo dice haber construido numerosas bóvedas tabicadas en Madrid.

El tratado de Fray Lorenzo gozó de gran difusión en los siglos posteriores (al parecer era empleado por los constructores todavía a principios del siglo XX). No es extraño, se trata de un libro excepcional por la abundancia de temas tratados y por la claridad de su exposición. Sus reglas para los estribos se citan, por ejemplo, en los tratados de García Berruguilla (1747) y Plo y Camín (1767). Cuando Benito Bails (1796) habla «De las bóvedas tabicadas» en su Tratado de arquitectura civil empieza transcribiendo los párrafos correspondientes del tratado de Fray Lorenzo.

Por supuesto, Fray Lorenzo y el resto de los constructores educados en la construcción tabicada sabían que, una vez terminada la bóveda tabicada, la única diferencia en el comportamiento estructural en relación con las de rosca de ladrillo o de piedra era el menor empuje por la reducción en peso. Seguían haciendo falta estribos, aunque menores. El resto de las circunstancias eran idénticas. En particular, las bóvedas tabicadas también se agrietan y las patologías son idénticas a las de ladrillo o piedra.²

La tradición tabicada en Francia. El conde D'Espie y el mito del «monolitismo»

En Francia existió una tradición tabicada de influencia española en la región del Rosellón, que Bannister (1968)

ha estudiado exhaustivamente. Hacia 1700 esta tradición constructiva pasó al Languedoc francés y, en particular, el duque de Belle Isle construyó una serie de bóvedas tabicadas en su castillo, empleando para ello albañiles de Perpignan. La construcción de estas bóvedas tan ligeras causó gran sensación en aquel momento y fueron discutidas en la Académie Royale d'Architecture tras una memoria presentada el 19 de junio de 1747 por un tal M. Tavenot (Lemmonier, 1920). La Académie no aprobaba esta nueva (para ellos) práctica constructiva, pero la memoria presentada por Tavenot es relativamente extensa y se incluyó información adicional en los apéndices. Entre los presentes se encontraba Blondel que luego contribuyó de manera decisiva a popularizar esta práctica al dedicarle un capítulo completo de su tratado.

En particular un noble ilustrado, ya retirado, el Conde d'Espie viajó para conocer estas bóvedas in situ. Le interesaba la posibilidad de construir forjados y cubiertas tabicados por su invulnerabilidad al fuego. Viajó estudiando edificios que contenían estas obras y, finalmente, construyó él mismo un edificio dotado de cubiertas incombustibles. Todas sus experiencias y opiniones las recogió en un librito, publicado en 1754, titulado *Manière de rendre toutes sortes d'édifices incombustibles, ou Traité sur la construction des voûtes, faites avec des briques et du plâtre, dites voûtes plates, et d'un toit de brique, sans charpente, appelé comble briqueté* (Manera de construir toda suerte de edificios incombustibles, o tratado de la construcción de bóvedas, hechas con ladrillo y yeso, llamadas bóvedas planas, y de un tejado de ladrillo, sin madera, llamado «comble briqueté»)³. El libro recibió una atención inusual y en pocos años se publicó traducido al inglés (1756), al alemán (1760) y al español (Sotomayor, 1776).

Espie dedica un capítulo a comparar las bóvedas tabicadas con las bóvedas ordinarias.⁴ Empieza describiendo de forma cualitativa la forma en que empujan las bóvedas de fábrica. Así, indica que hay que considerar el espesor de la bóveda, su altura o flecha y la altura del estribo. Cita a Bélidor (1729) en relación con el cálculo de empujes y advierte de los peligros de basar los proyectos en una práctica que no se basa en la teoría. Inmediatamente observa que las citadas reglas no se aplican a las bóvedas tabicadas pues estas son de «una naturaleza

diferente». En particular observa que «él no es de los que creen que estas bóvedas empujan contra los muros». ⁵ (La observación es extremadamente interesante pues indica que las opiniones de Espie no eran compartidas por todos.) Después cita una serie de observaciones, unas realizadas por él personalmente, otras referidas por segundas personas. En un caso realiza una prueba de carga; en otro, corta la bóveda salvo las cuatro esquinas. Realiza agujeros en bóvedas construidas. También relata la experiencia de un conocido que construyó una pequeña bóveda sobre un marco de madera y, una vez fraguado el mortero, la hace rodar por una estancia y la golpea con un martillo. Resulta evidente que quien escribe no es un constructor familiarizado con la técnica tabicada. Finalmente, reconoce que ha habido hundimientos de bóvedas tabicadas pero los atribuye a la mala ejecución o a malos materiales.

En resumen Espie está convencido del monolitismo y la consiguiente ausencia de empuje de las bóvedas tabicadas. Por otro lado, el libro contiene una descripción minuciosa de la forma de construcción e insiste en el carácter incombustible de estas estructuras, en su ligereza y adaptabilidad.

La influencia del tratado de Espie

Las ideas y experiencias recogidas por Espie fueron aceptadas, en general, sin crítica por los autores posteriores. La ausencia de empuje y la invulnerabilidad al fuego eran argumentos poderosos que suscitaron un interés inmediato, no sólo en Francia sino también en el resto de Europa. El que hubiera traducciones al español, inglés y alemán en pocos años es un hecho inusual. Además, importantes tratadistas franceses y europeos se hicieron eco de este nuevo sistema constructivo, basándose en el libro de Espie y recogiendo sus ideas. Este el caso Laugier (1755) y de Rieger (1763), pero tuvo particular importancia que las bóvedas tabicadas recibieran un extenso tratamiento en el tratado de Blondel/Patte (1771-7), uno de los más influyentes de su época. En el tomo sexto se le dedica un capítulo completo, con una 40 páginas y 7 estupendas láminas que, sin duda, contribuyeron a difundir la construcción tabicada.

Dos decenios más tarde Rondelet (1802) resumió esta información en un apartado de su *Traité de l'art de bâtir*, dedicándole, además, una lámina completa. El tratado de Rondelet fue uno de los más influyentes del siglo XIX; se imprimieron numerosas ediciones y fue traducido al alemán e italiano. Así, pues, a principios del siglo XIX en Francia había una teoría de la construcción tabicada que se basaba, principalmente, en las opiniones de un noble ilustrado que quería «servir a la comunidad».

En resumen, algunas de las ideas más fantásticas (monolitismo, ausencia de empuje, etc.) sobre la cons-

trucción tabicada, que se difundieron con rapidez por toda Europa (incluso volviendo a España, lugar de origen de la práctica constructiva tabicada), tienen su origen en el tratado del conde de Espie. Estas ideas llegaron a formar el «marco de referencia» oficial para aproximarse a estas estructuras; su influencia, como veremos ha llegado hasta la actualidad.

La edición española de Sotomayor y la «Censura» de Ventura Rodríguez

El libro de Espie fue traducido al castellano por Joaquín de Sotomayor (1776). Sotomayor incorpora, entre corchetes, sus propias opiniones y experiencias. Resulta interesante que el libro vaya precedido de una «Censura de D. Ventura Rodríguez, Arquitecto mayor de Madrid». El comienzo marca el tono de la censura: «Lograría considerables ventajas el arte de edificar, si todas las ideas que nos proponemos asequibles tuvieran en la práctica el buen éxito que a la fantasía aparece». A continuación sigue una crítica acerba de las ideas fundamentales de Espie: el monolitismo y la consiguiente falta de empujes. Ventura Rodríguez cita varios casos de agrietamientos y desplomes en edificios construidos que demuestran el empuje de las bóvedas:

Pero esta suposición [de ausencia de empujes], o creencia, es lisonjera no obstante las experiencias que cita, y no se verifica efectiva, como acreditan los evidentes ejemplos que tenemos en casi todos los Templos de Madrid, cuyas bóvedas son tabicadas de ladrillo y yeso, de curvatura más elevada, y con paredes mas gruesas, amparadas de estrivos, que a favor de la firmeza son grandes ventajas ... y las vemos quebrantadas por muchas partes, y con desplomo en las paredes, ocasionado del empuje ...

Insiste varias veces en la necesidad de dar contrarresto suficiente a las bóvedas sean tabicadas y recalca la importancia de la «firmeza», además de la «hermosura» y la «comodidad», pues si aquélla falta «todo es perdido». Ventura Rodríguez, pues, no comulga con las opiniones de Espie y Sotomayor, considerándolas incluso peligrosas.

Hay que resaltar que Sotomayor, como Espie, era un aficionado a la construcción, no un constructor. Ventura Rodríguez, un arquitecto de gran experiencia vio inmediatamente los errores de la teoría «monolítica», sin empujes, del conde de Espie.

Tratados españoles de la primera mitad del XIX: Bails y Fornés

En el siglo XIX hay dos tratados que se ocupan con cierta extensión de la construcción tabicada, los de Be-

nito Bails (1796) y Fornés y Gurrea (1841, 1846). Bails es fundamentalmente un compilador. En primer lugar transcribe los párrafos correspondientes de Fray Lorenzo de San Nicolás. Después, muestra su extrañeza por la animadversión y desconfianza que suscitan estas bóvedas:

En vista de autoridad de tanto peso en estas materias [Fray Lorenzo] he extrañado mucho la oposición que en algunos facultativos he notado hacia estas bóvedas, asegurándome unos que acá no se podían hacer, desconfiando otros de que puedan servir si sobre ellas se hubiere de cargar algun peso, y empeñados los mas en que por lo mucho que empujan las paredes en que estriban, o no va segura la obra, o es indispensable gastar mucho hierro para su fortificación.

Nótese que uno de los inconvenientes aducidos es el de su empuje, quizá, como Ventura Rodríguez para desmentir las teorías de Espie. No obstante, como se ha señalado antes Fray Lorenzo considera que las bóvedas tabicadas empujan, aunque menos que las de piedra o rosca de ladrillo.

A continuación, Bails se limita a extractar, copiando párrafos enteros y reproduciendo las láminas, el capítulo correspondiente del tratado de Blondel/Patte, aunque sin citarlo en ningún momento.

Los tratados de Fornés son originales. En el primero publicado en 1841 y reeditado en 1857, expone la manera de construir bóvedas tabicadas con cierta extensión. Fornés expone con gran detalle la forma de construir los principales tipos de bóvedas tabicadas: de cañón (con y sin lunetos), de escaleras (a montacaballo y de caracol), cúpulas y pechinas, etc.

En cuanto a los empujes, Fornés considera que las bóvedas tabicadas empujan, aunque menos, debido a su menor espesor. No obstante, Fornés conoce las ideas de Espie (seguramente a través del tratado de Blondel/Patte) y empiezan a aparecer contradicciones. Así, en una primera parte del tratado afirma:

Porque en las tabicadas ... son muchos los puntos a que debe atenderse. Después de ordenar el grueso de las paredes sobre las cuales han de apoyar las bóvedas con relación a su capacidad y mayor o menor monte, pues de esta dimana la demarcación de sus empujes, en que consiste su solidez y firmeza.

Las bóvedas tabicadas empujan en función de su peralte: es la teoría tradicional. Pero, más adelante, en un apartado titulado «Instrucciones sobre la elaboración de las bóvedas tabicadas», aparece ya la influencia de las ideas de Espie. Primero insiste en que «el mayor o menor empuje de las bóvedas pende de su mucha extensión, o de ser mas o menos rebajadas, y de su grueso, y que en las tabicadas este es apenas reparable», pero

poco más adelante afirma: «... cubierta la obra y paredes enjutas, su fábrica se reduce a un cuerpo sólido, igual por ejemplo a una cobertera de puchero, sin mas empuje que el de su peso».

Los primeros ensayos científicos en Francia

Uno de los problemas de la historia de la construcción tabicada es que se ha realizado por zonas. Así, se conoce bien en Cataluña y Extremadura pero los estudios sobre el resto de España son casi inexistentes, a pesar de la abundancia de estas bóvedas a partir del siglo XVII. La construcción tabicada también es propia de Italia (bóvedas a la volterrana) y, como se ha visto, de Francia. Finalmente también hay bóvedas tabicadas en el norte de África (Argelia). Pero tampoco sobre estos lugares existe más que algunas contribuciones dispersas (véase la Bibliografía de este libro). Los avances en el conocimiento de esta construcción sólo se realizarán cuando el ámbito geográfico de estudio sea supranacional.

Así, aunque se considera que fue Guastavino el autor de los primeros ensayos de resistencia, con anterioridad se estaban realizando ya en Francia: D'Olivier (1837) y Fontaine (1865). De particular interés son los ensayos descritos por Fontaine pues se trata de ensayos de rotura a gran escala. Uno de los ensayos descritos es sobre tres bóvedas tabicadas de 4 m de luz (1/10 de flecha), entre perfiles en I de hierro forjado (de 47 cm de canto) con una luz de 6,25 m, cubriendo una superficie de 72 m². El ensayo se llevó hasta la rotura, produciéndose para una sobrecarga de 1.250 kg/m². En otro ensayo anterior sobre otra bóveda tabicada de un solo vano de 3,75 m (1/10) de flecha se alcanzó una sobrecarga de 2.700 kg/m², sin llegar a la rotura.

No aquí espacio para analizar los resultados de estos ensayos, pero hay que resaltar que ensayos de tal magnitud no se hacen de manera aislada y que es de esperar que se produjeran en el contexto de construir bóvedas incombustibles para edificios fabriles (de hecho la modulación en planta del ensayo de tres bóvedas coincide con la habitual para fábricas textiles).

Rafael Guastavino Moreno: la teoría de la «construcción cohesiva»

Rafael Guastavino Moreno fue el primero en intentar formular una teoría que explicase, de forma científica, el comportamiento estructural de las bóvedas tabicadas. Sus ideas fueron expuestas primero en una serie de conferencias en la Sociedad de Artes del Instituto Tecnológico de Massachusetts en 1889. Luego fueron publicadas en forma de artículos de revista en ese mismo año y

el siguiente, y, finalmente, fueron recogidas en su libro *Essay on The theory and history of cohesive construction, applied especially to The timber arch* (Ensayo sobre la teoría e historia de la construcción cohesiva, con particular atención a la bóveda tabicada) publicado en 1892.⁶

Con posterioridad Guastavino publicó algún artículo y dio algunas conferencias más (véase la Bibliografía de este libro); también publicó otro libro titulado *Prolegómenos sobre la función de la fábrica en las modernas construcciones*. Este último libro es clave para entender el pensamiento arquitectónico de Guastavino, pero no incluye ninguna novedad en cuanto a las ideas y cálculos sobre el comportamiento estructural de las bóvedas tabicadas.

La necesidad de una teoría

Rafael Guastavino sintió, seguramente desde el principio de su carrera, la necesidad de formular una teoría que permitiera entender el comportamiento de las construcciones tabicadas. Así, en el prólogo del *Essay* dice:

No es posible explicar los procesos prácticos, o tener convicciones, sin algún fundamento racional. Estas razones forman la teoría científica que me vi obligado a elaborar para poder tener convicciones y, también, para poder tener alguna garantía de que mis obreros podrían trabajar con seguridad (*Essay*, 8)

También menciona en el prólogo las clases que recibió en la Escuela de Barcelona de sus maestros Juan Torras y Elías Rogent. Según dice, fueron ellos quienes le llamaron la atención sobre esta forma de construcción que, según afirma en varios lugares de su libro, había sido olvidada durante largo tiempo, aunque esta afirmación resulta dudosa.⁷ No sabemos en qué pudieron consistir estas clases pero es probable que se trataran las ideas de monolitismo y continuidad del conde de Espie, recogidas como hemos visto en algunos tratados españoles (Sotomayor, Bails, Fornés).

En cualquier caso, Guastavino en su etapa barcelonesa se había convertido en el mejor constructor de bóvedas tabicadas del momento. En el *Essay* habla de sus comienzos como si hubiera empezado prácticamente de cero, como si la construcción tabicada estuviera completamente olvidada. Usó como banco de pruebas su primera obra importante, la enorme fábrica Batlló. Allí no sólo empleó las bóvedas tabicadas a una escala hasta entonces desconocida, también ensayó la construcción de hormigón. En éste último caso tuvo numerosos problemas por la mala calidad del cemento. Este hecho le marcó para el resto de su carrera profesional: nunca consideró que el hormigón tuviera ningún futuro como material de construcción.⁸

Concentrado, pues, en la construcción tabicada reflexionó sobre sus características tratando de formular una teoría general. Cuenta cómo aplicó este sistema en la construcción de una casa de pisos, su propia residencia:

Realicé el primer experimento sobre mí mismo, de la misma forma que un médico prueba su propia medicina. Llevé a cabo mis ideas edificando una casa de cuatro plantas, sin emplear prácticamente vigas, todo construido de ladrillo y cemento. (*Essay*, 15)

A esta obra siguieron muchas otras, algunas con bóvedas de gran tamaño, como la cúpula rebajada de casi 20 m de luz del teatro de Vilasar. Pero Guastavino reconoce que la estructura de todas estas obras se proyectó de forma empírica:

Pero todo este trabajo fue casi por completo empírico. No había una justificación técnica y, ¿cómo podría haberla tenido? El espesor de las bóvedas se calculó por intuición, de la misma forma que un buen herrero el tamaño de las piezas que usa o que un buen marinero elige el grosor de un cuerda.

Guastavino, en realidad, estaba aplicando las reglas y métodos tradicionales de proyecto de estructuras de fábrica, que había aprendido durante sus estudios y experiencia constructiva. Estas reglas, principalmente geométricas, codificaban la experiencia adquirida a lo largo de los años y son del tipo correcto para estructuras de fábrica.⁹ Pero a finales del siglo XIX, con la teoría de estructuras ya bien desarrollada, era una exigencia ineludible justificar las dimensiones de los elementos de una estructura en base a cálculos basados en la teoría de estructuras y en la resistencia de materiales. Guastavino ya era consciente de este hecho en su etapa en Barcelona, pero a partir de su llegada a Nueva York se dio cuenta de la absoluta necesidad de elaborar una teoría de las bóvedas tabicadas, con una parte teórica y otra práctica, basada en los resultados de los ensayos. Por supuesto, la teoría de estructuras era la «teoría elástica» cuyos objetivos y métodos fueron formulados por Navier en 1826 y habían sido desarrollados durante el resto del siglo XIX para su aplicación, principalmente, al cálculo de estructuras claramente «elásticas» como eran las construidas en hierro y madera. Los arcos de fábrica empezaron a calcularse elásticamente a partir del decenio de 1870.¹⁰

El marco teórico de referencia: La teoría elástica

La teoría elástica dominaba el pensamiento estructural en la segunda mitad del XIX y es indudable que, aunque Guastavino no era un teórico de las estructuras, las ideas principales de la teoría elástica tuvieron que influir en

su pensamiento, mezclándose con otras ideas sobre la naturaleza de las estructuras tabicadas. Repasemos brevemente estas ideas.

La teoría elástica se aplica a estructuras hechas de un material elástico lineal (que obedece la ley de Hooke). El material se supone, además, continuo, homogéneo e isótropo. Las ecuaciones del material, juntos con las de compatibilidad y las de equilibrio, permiten hallar los esfuerzos internos en una estructura hiperestática. Conociendo estos esfuerzos, las fórmulas de la resistencia de materiales permiten calcular las tensiones que, finalmente, se comparan con las tensiones de rotura obtenidas en los ensayos. El objetivo final del análisis es, pues, para un cierto sistema de cargas, hallar la distribución elástica de tensiones en la estructura en equilibrio con dichas cargas que respeta las condiciones de compatibilidad (de contorno, etc.) estipuladas, localizar los puntos en que éstas se hacen máximas y comparar estas tensiones máximas con las de los ensayos de rotura. El requisito que se examina es el de «resistencia».

La teoría sobre la «construcción cohesiva»

Guastavino divide las construcciones de fábrica en dos grupos en función de su comportamiento mecánico:

Se pueden considerar dos tipos generales de construcción: la «construcción mecánica», o construcción por gravedad, y la «construcción cohesiva», o por asimilación.

La primera se basa en la resistencia de cualquier sólido a la acción de la gravedad cuando es contrarrestado por otro sólido. De este conjunto de fuerzas, más o menos opuestas entre sí, resulta el equilibrio de la masa total, sin tener en cuenta el poder cohesivo del material existente entre los sólidos.

La segunda tiene por fundamento las propiedades de cohesión y asimilación de distintos materiales que, por una transformación más o menos rápida, imitan el proceso de formación de conglomerantes en la Naturaleza. (*Essay*, 44)

La construcción tabicada es cohesiva, pero no es el único tipo de construcción cohesiva. En la segunda parte de su *Ensayo* realiza una revisión histórica que resulta algo confusa. Así, la construcción romana de hormigón es, evidentemente, cohesiva, pero Guastavino también considera cohesivas la bizantina e islámica de ladrillo y menciona la Edad Media como «la época en que se desarrolló verdaderamente el sistema cohesivo» (*Essay*, 29). La lista de edificios citados incluye algunos de los edificios más notables de diferentes épocas y estilos: las termas de Caracalla, Santa Sofía, la catedral de Zamora, Santa María del Fiore y el Baptisterio en Florencia, San Pedro de Roma, Santa Genoveva de París, San Pablo de Londres, . . . y dos cúpulas tabicadas valencianas, la de la Basílica de los Desamparados y la de los Escolapios.

Aparentemente, cualquier edificio construido con un material que presente una buena adhesión con el mortero, ya sea hormigón romano, una fábrica de ladrillo o una bóveda tabicada, entra dentro de la construcción cohesiva. Así, tras la definición anterior, basada en el comportamiento estructural aporta otra que podríamos llamar constructiva:

Podemos dar otra definición más precisa y extensa para ambos sistemas, estableciendo que el primer sistema, o mecánico, es aquel en el que todos los elementos pueden separarse uno a uno y después recomponerse de la misma forma o similar. A este tipo pertenecen las pirámides de Egipto y los templos griegos, etc. En la construcción cohesiva, por el contrario, no se pueden separar los componentes sin destruir la masa en su integridad. (*Essay*, 45)

Guastavino estaba fascinado por la posibilidad de construir edificios por «aglomeración» de pequeñas piezas, como la naturaleza hace al formar sus conglomerados y describe la fascinación que en este contexto le produjo su visita a la gran cueva del Monasterio de Piedra:

Aquí, en este «Monasterio de Piedra,» pude ver una gruta inmensa, . . . cubierta por una enorme bóveda natural, soportada por muros de la misma naturaleza, con estalactitas de todas las formas y tamaños suspendidas del techo como grandes arañas... (*Essay*, 12)

Inmediatamente, le viene a la mente la relación entre esta forma natural de construcción y la construcción tabicada que él empleaba:

Mientras contemplaba esta cascada de agua en esta inmensa estancia, me invadió el pensamiento de que todo este espacio colosal estaba delimitado por un único elemento constituido por una sólida masa de muros, cimientos y cubierta, y de que se había construido sin cimbras o andamios, y sobre todo, sin necesidad de elementos pesados de piedra, pesadas vigas o pesadas cimbras; un todo compuesto de partículas colocadas unas sobre las otras, tal como la naturaleza las había dispuesto. (*Essay*, 13)

El pasaje es clave a la hora de entender el pensamiento estructural de Guastavino. Esta idea de que la construcción cohesiva (y la construcción tabicada es cohesiva) es una construcción «natural» y, por tanto, «más racional, duradera y económica», le vino como una revelación y fue la fuerza motriz que le impulsó en su trabajo durante toda su vida. Como veremos, el carácter cohesivo no influye en el comportamiento esencial de las fábricas, pero los trabajos e investigaciones destinados a mejorar la cohesión se tradujeron en una perfección en la ejecución del sistema tabicado, como nunca antes se había conocido.¹¹ Por otra parte, la característi-

ca esencial de la construcción tabicada, la posibilidad de prescindir de cimbras, pasa a un segundo plano.

Los materiales: ladrillos y morteros

Uno de los mayores méritos de Guastavino es su insistencia en la buena calidad de los materiales. Para conseguir su ideal de una estructura perfectamente cohesiva, que formara como un monolito, donde no aparecieran grietas, que resistiera las inclemencias del tiempo, etc... era indispensable emplear los materiales más adecuados a su cometido constructivo y resistente, y cuidar la ejecución. Por ello, nada más llegar a Nueva York, dedicó sus esfuerzos a conocer las prácticas constructivas:

No había transcurrido mucho tiempo desde mi llegada cuando me di cuenta de la necesidad de estudiar los métodos, materiales y recursos americanos. A este trabajo dediqué cinco años. Era absolutamente imprescindible que me informase bien, sobre todo, en relación con los arcos tabicados: primero, porque el cemento es el componente esencial; segundo, por la ejecución de los arcos, ya que un fallo en esta fase hará peligrar las vidas de los trabajadores; tercero, porque al utilizar los arcos, que permiten una construcción rápida, para construir forjados, era necesario también que éstos fueran liberados para el uso en poco tiempo; por lo tanto, necesitaba conocer exactamente con qué clase de material iba a trabajar y bajo qué condiciones.

Para construir bóvedas tabicadas hacen falta morteros y ladrillos adecuados, que garanticen la «cohesión» perfecta entre todos los elementos. Los ladrillos deben ser de buena calidad, de dimensiones adecuadas (unos $30 \times 15 \times 2,5$ cm) y con una cierta porosidad que favorezca la adhesión del mortero. Éste debe ser de fraguado rápido y, sobre todo, hidráulico. El yeso, que fue usado tradicionalmente en la construcción tabicada, fragua con gran rapidez, pero Guastavino lo rechaza por su pérdida de resistencia al estar en contacto con el agua. Así, en sus inicios sólo la primera hoja se tomaba con yeso; el doblado y las siguientes hojas se recibían con mortero de cemento Portland. Guastavino da una enorme importancia a los morteros, seguramente por las desagradables experiencias que sufrió en sus inicios debido a la falta de uniformidad y calidad de las partidas de cemento.

Ventajas de las bóvedas tabicadas «cohesivas»

Guastavino dedica un apartado a explicar las diferencias entre la construcción por gravedad y la cohesiva en relación con las bóvedas tabicadas, con el fin poner de manifiesto las ventajas esta última (*Essay*, 49-57). Compara un arco tabicado de una hoja con otro arco tabicado de dos hojas, Figura 1.



Fig. 10.



Fig. 11.

Figura 1.

Comparación entre un arco mecánico y otro cohesivo (Guastavino, *Essay*, 1893)

En el arco de una hoja hay juntas entre los ladrillos que, dice, por tanto funcionan como dovelas: se trata de un arco por gravedad tradicional. El doblado, con la capa de mortero entre las dos hojas y disponiendo siempre los ladrillos a juntas encontradas, hace que el arco funcione como una estructura cohesiva, capaz de resistir momentos flectores. La evidencia de este aserto es que es posible construir bóvedas de cañón de 6 m de luz y sólo 7,5 cm de espesor empleando sólo una forma desplazable; al cabo de unas horas los obreros pueden caminar sobre la bóveda sin ningún peligro; finalmente, la forma puede correrse sin dificultad bajo la bóveda construida prueba de que ésta no se ha deformado. No es casualidad que el propio Guastavino se fotografiara de pie sobre uno de los arcos tabicados de la Biblioteca de Boston.

Otra de las ventajas estructurales que Guastavino atribuye a las bóvedas y arcos tabicados es la disminución del número de juntas. De hecho si fuera posible construir sin juntas esto sería idóneo: «Es evidente que si fuéramos capaces de construir un arco sin juntas, sería lo mejor, ya que no sufriría asentos» (*Essay*, 52). Otra vez aparece el mito del monolitismo. Por supuesto los arcos y bóvedas de fábrica se agrietan, puesto que los asentos proceden no del arco sino de cambios, muchas inevitables, de las condiciones de contorno.¹²

Guastavino dedica algunos párrafos al problema del agrietamiento de un arco escarzano rebajado, Figura 2. Si el arco es de dovelas, con juntas, entonces se forma una grieta en la clave y ésta baja (de hecho, como es sabido hacen falta otras dos grietas para que el mecanismo sea compatible; pero Guastavino no las cita). Este movimiento pondría en peligro el arco y, además, perjudica el proceso de fraguado del mortero.

El arco tabicado inferior podría evitar la aparición de la grieta, puesto que es capaz de resistir flexiones por la

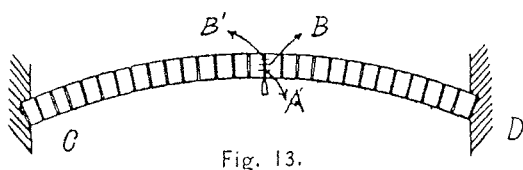


Fig. 13.

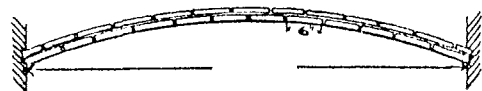


Fig. 14

Figura 2.

Agrietamientos en arcos escarzanos: comparación entre un arco de dovelas y un arco tabicado (Guastavino, *Essay*, 1893)

capacidad de resistir tracciones que aporta el matado de las juntas. Además, dado que hay menos juntas el arco tabicado funciona mejor: «Puesto que sabemos que el arco sin juntas es el mejor, será preferible el arco que tenga menos juntas» (*Essay*, 53). Así, Guastavino resume las ventajas de los arcos y bóvedas tabicados en relación con los arcos mecánicos:

- 1) Las juntas verticales quedan protegidas contra el agrietamiento por el doblado a juntas encontradas;
- 2) Hay un menor número de juntas verticales;
- 3) Capacidad de resistir momentos flectores.

Por supuesto, los arcos de hormigón en masa son arcos cohesivos y presentan estas propiedades en su grado más alto por la ausencia de juntas, pero Guastavino los descarta por el coste excesivo de las cimbras y por los problemas que podría plantear un fraguado irregular (alude a sus ya citados problemas con el hormigón en la construcción de la cimentación de la fábrica Batlló).

Ensayos de resistencia

Guastavino era muy consciente del problema que supondría convencer a los arquitectos americanos de las bondades del sistema tabicado de construcción. Incluso en España, donde la práctica se remontaba a varios siglos atrás, estas estructuras eran vistas por muchos con desconfianza. Las especulaciones teóricas e históricas eran necesarias pero había, sobre todo, que realizar ensayos científicos.

Aunque, como se ha visto, se realizaron ensayos con anterioridad en Francia, Guastavino realizó, a partir de 1887, los primeros ensayos sistemáticos, tanto sobre probetas como sobre estructuras (bóvedas de cañón tabica-

das). También realizó ensayos de incendios, para demostrar la invulnerabilidad al fuego del sistema tabicado.

En los ensayos sobre probetas trató de obtener unos valores de las tensiones de rotura a compresión, tracción, cortante y flexión, Figura 3, que le permitieran verificar la seguridad de sus bóvedas por comparación de las tensiones de trabajo. Se trata, pues, del enfoque de resistencia de Navier. Los resultados de los ensayos se resumen en la Tabla 2. Es interesante que no se cite ningún intento de determinar las constantes elásticas, el módulo de Young, el módulo de deformación transversal o el coeficiente de Poisson.

Resistencia	N/mm ²
compresión	14,6
tracción	2,0
cortante	0,9

Tabla 2. Tensiones de rotura obtenidas en ensayos de laboratorio (Guastavino, *Essay*, 1893)

Para contrastar estos resultados con estructuras reales, realizó ensayos de rotura sobre bóvedas tabicadas escarzanas, con una flecha de 1/10 de la luz y. En la Figura 4 se muestra la foto de uno de estos ensayos. Desde luego, el resultado es espectacular; la foto dice más en favor de la resistencia de las bóvedas tabicadas que cualquier teoría o conjunto de ensayos de laboratorio. En este caso, es evidente que los ensayos tenían una parte propagandística, que, por otra parte no era inusual a finales del siglo XIX.¹³

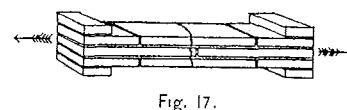


Fig. 17.

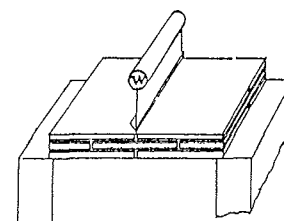
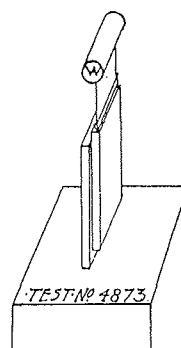


Figura 3.

Ensayos de resistencia realizados por encargo de Guastavino: a) tracción; b) flexión; c) cortadura (Guastavino, *Essay*, 1893)



Figura 4.
Ensayo de resistencia sobre una bóveda de cañón tabicada Ar-
chivo Guastavino, Avery Library)

Cálculo del empuje y las tensiones en bóvedas de cañón y cúpulas tabicadas

Prácticamente la única información sobre los métodos de cálculo empleados por Guastavino se encuentra en el *Essay*. Los métodos gráficos parece que deben atribuirse a su hijo Guastavino Expósito y se tratarán más adelante. Guastavino trata dos temas típicos: la bóveda de cañón rebajada y la cúpula semiesférica, también rebajada.

Para un arco o bóveda escarzano da la siguiente fórmula (he modernizado la notación):

$$A\sigma_{rot} = \frac{Wl}{8f} \quad (1)$$

donde:

A = área por unidad de longitud transversal a la bóveda en la clave

σ_{rot} = tensión de rotura a compresión

W = carga total (peso propio más relleno y sobrecarga) que actúa sobre la bóveda por unidad de longitud transversal

l = luz de la bóveda

f = flecha de la bóveda

La fórmula relaciona (para un arco de luz l y flecha f dados) la carga W , con el área A (esto es el espesor) y la tensión de rotura σ_{rot} .

Se trata de la conocida expresión del empuje de un arco parabólico sometido a una carga uniformemente repartida, aunque la «demostración» de Guastavino es difícil de comprender. La fórmula es, por supuesto, aproximada (la carga real no es exactamente uniforme), pero para bóvedas rebajadas es suficientemente buena. Guastavino da un ejemplo de aplicación: calcular el espesor

de un bóveda de $l = 4,575$ m; $f = l/10$; que ha de soportar una carga uniformemente repartida de 12 kN/m^2 con un material que tiene una tensión de rotura $14,6 \text{ N/mm}^2$. Guastavino considera que la tensión de trabajo admisible es $1/10$ de la tensión de rotura. Entrando en la fórmula con la tensión admisible de $1,46 \text{ N/mm}^2$ se obtiene un espesor de $4,7$ cm, esto es dos hojas de ladrillos o rasillas de una pulgada ($2,54$ cm) de espesor. Por supuesto, considerar 10 como coeficiente de seguridad es, quizá, excesivo incluso para un material irregular como la fábrica tabicada y más adelante (*Essay*, 64) Guastavino reconoce que se podría considerar como tensión de trabajo $1/4$ ó $1/5$ de la tensión de rotura.¹⁴ De hecho, en las fábricas, también en las tabicadas, el criterio que decide el proyecto de la estructura no es de resistencia sino de estabilidad y la seguridad se obtiene dando un espesor suficiente. Puede ser que la oscilación entre 10 y 4 del coeficiente de seguridad le permitía a Guastavino obtener el espesor que le parecía adecuado en cada momento.

La fórmula le permite hallar el espesor en la clave. El esfuerzo será mayor en los arranques y para hallar el nuevo espesor aplica la que denomina «fórmula de De-jardin»; el espesor varía a partir de la clave en función del inverso del coseno del ángulo que fija la posición del punto.¹⁵

El cálculo de Guastavino es, evidentemente, un cálculo de equilibrio por el que obtiene un valor del empuje, para luego hacer comprobaciones de resistencia (normalmente innecesarias) y para calcular el sistema de contrarresto, ya sea mediante estribos de fábrica o, con mayor frecuencia, mediante algún sistema de tirantes de hierro forjado.

No obstante, a finales del siglo XIX el cálculo elástico era considerado como la mejor opción para analizar arcos de fábrica y el enfoque de equilibrio, aunque se empleaba en la práctica, era mirado con suspicacia por los ingenieros. Guastavino con toda probabilidad no tenía la formación suficiente para realizar un cálculo elástico que, incluso, en los casos más sencillos conduce a complicadas integrales. Por este motivo encargó a un profesor de mecánica aplicada del MIT, G. Lanza, el cálculo de una tabla para el cálculo (elástico) de las tensiones en arcos tabicados, con flecha de $1/10$ de la luz, teniendo en cuenta el esfuerzo normal y el momento flector, Figura 5. La tabla se incluye, sin explicación sobre las hipótesis de cálculo, al final del libro. Otro paso más a la hora de dar respetabilidad científica al cálculo de bóvedas tabicadas. Comparando los resultados de la aplicación de su fórmula con la tabla no se aprecian, como es lógico para arcos rebajados, diferencias significativas.

Trata a continuación las cúpulas, que considera la forma por excelencia: «La cúpula es la forma genuina de la construcción cohesiva para techos, forjados y cu-

TABLE OF THEORETICAL STRESSES FOR ARCHES 10% RISE WITH UNIFORM LOAD (W) PER SQ. FT.

Span in Feet.	Rise in Inches.	Thickness in Inches.	Area of Sec., 12 in. wide.	I of Section, 12 inches wide.	Bending moment at crown, $\frac{W \times L^2}{8}$	Stress due to bending-moment $\frac{M}{W \times}$	Thrust at crown $\frac{W \times L}{4}$	Stress due to thrust at crown $\frac{T}{W \times}$	Thrust at springing $\frac{W \times L}{4}$	Stress due to thrust at springing $\frac{T}{W \times}$	Maximum stress at crown $\frac{M}{W \times} + \frac{T}{W \times}$
5	6	2	24	8	.540	.0675	6.16	.25667	6.673	.278	.32417
5	6	3	36	27	.540	.03	6.16	.17111	6.673	.18536	.20111
6	7.2	3	36	27	.7776	.0432	7.392	.20533	8.008	.2227	.24853
7	8.4	3	36	27	1.0854	.0588	8.624	.23956	9.3125	.2595	.29836
8	9.6	3	36	27	1.3824	.0768	9.856	.27378	10.677	.2966	.34458
9	10.8	3	36	27	1.7496	.09719	11.088	.30800	12.013	.3372	.40518
10	12.0	3	36	27	2.16	.12	12.320	.34222	13.346	.3707	.46222
11	13.2	3	36	27	2.6136	.1452	13.552	.37644	14.598	.4055	.52164
12	14.4	3	36	27	3.1104	.1728	14.784	.41067	16.016	.4449	.58347
12	1.44	4	48	64	3.1104	.0972	14.784	.308	16.016	.3337	.4052
13	1.56	4	48	64	3.6504	.1140	16.016	.33367	17.351	.3615	.44767
14	1.68	4	48	64	4.2336	.1323	17.248	.36033	18.685	.3768	.49163
15	1.80	4	48	64	4.860	.15187	18.480	.38500	20.02	.4171	.53637
16	1.92	4	48	64	5.5296	.1728	19.712	.41067	21.355	.4449	.58347
16	1.92	5	60	125	5.5296	.1106	19.712	.32853	21.355	.3559	.43913
17	2.04	5	60	125	6.424	.1285	20.944	.34907	22.689	.3781	.47767
18	2.16	5	60	125	6.9884	.13977	22.170	.36960	24.024	.4004	.50937
19	2.28	5	60	125	7.7976	.15595	23.408	.39013	25.359	.4225	.54608
20	2.40	5	60	125	8.64	.1728	24.64	.41067	26.693	.4449	.58347
20	2.40	6	72	216	8.64	.12	24.64	.34222	26.693	.3707	.46222
21	2.52	6	72	216	9.5256	.1323	25.872	.35933	28.028	.3893	.49163
22	2.64	6	72	216	10.4544	.1452	27.104	.37644	29.363	.4079	.52164
23	2.76	6	72	216	11.4264	.1587	28.336	.39355	30.697	.4263	.55225
24	2.88	6	72	216	12.4416	.1728	29.568	.41067	32.032	.4449	.58347

*To obtain bending-moments, stresses, and thrusts in the last seven columns, multiply the figures in column by load per square foot, including the weight of material.

Figura 5.

Tablas elaboradas por G. Lanza para el cálculo elástico de las tensiones en las bóvedas de cañón tabicadas (Guastavino, *Essay*, 1893)

biertas, así como de la construcción tabicada» (*Essay*, 66). Para calcular su empuje Guastavino acude a otra aproximación; razonando (erróneamente) de forma geométrica al comparar las áreas de una esfera y un semicilindro de la misma directriz, desarrollados en planta. En efecto cortando el cilindro como se indica en la figura y juntando las lunas rayadas se podría formar un cúpula poligonal de forma muy aproximada a una esfera y, viendo la planta, Guastavino considera que el peso de la cúpula es la mitad que el de la correspondiente bóveda de cañón y que, por tanto, el empuje será la mitad. De hecho, el peso es diferente y también cambia la posición de los centros de gravedad, pero el considerar el empuje de la cúpula mitad que el de la bóveda de cañón de la misma directriz, va a favor de seguridad, puesto que es normalmente menor (para una cúpula semiesférica está cerca del tercio). La idea proviene de Frézier, se difundió después en algunos manuales de arquitectura y construcción, y Guastavino pudo haberla aprendido en

sus clases de Barcelona.¹⁶ Si en el caso de los arcos rebajados la fórmula (1) daba una buena aproximación del empuje, en este caso puede haber desviaciones notables, como él mismo reconoce.¹⁷

Por otra parte, tras calcular el empuje de la forma indicada, sin considerar flexiones, incurre en una contradicción al afirmar: «Consideramos nuestro arco no como un arco de dovelas, sino como un arco simple de fundición que trabaja como una pieza maciza arqueada de piedra o hierro» (*Essay*, 69) y, más adelante, «Tampoco estamos considerando aquí una cúpula de dovelas, sino una simple cúpula de fundición que trabaja como una pieza única» (*Essay*, 72). A continuación dedica unos párrafos a explicar por qué el empuje de un arco tabicado existe pero es menor que el de un arco de dovelas y, siguiendo el razonamiento aplicado a las cúpulas observa que las cúpulas cohesivas, que resisten tracción, construyen sus propios anillos y en consecuencia la cúpula apenas empuja. Y sin embargo, en cualquier sección constructiva de una cúpula de Guastavino puede observarse un zuncho metálico y en los archivos se encuentran numerosos planos de tales zunchos, Figura 6.

El tratado contiene más observaciones sobre el funcionamiento estructural de las bóvedas tabicadas. Por

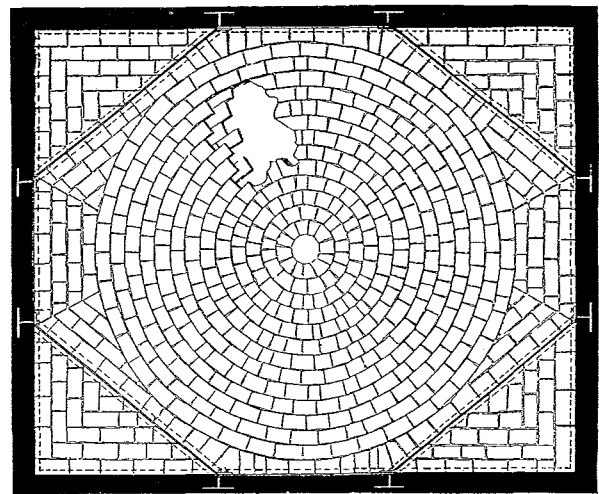
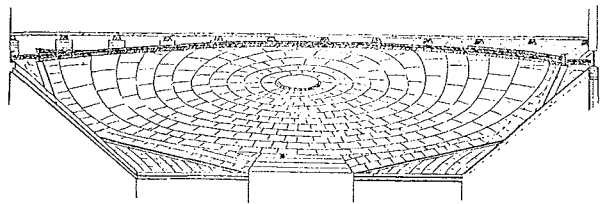


Figura 6.

Cúpula rebajada para forjado de piso. Nótese el zuncho metálico poligonal que absorbe los empujes (Guastavino, *Essay*, 1893)

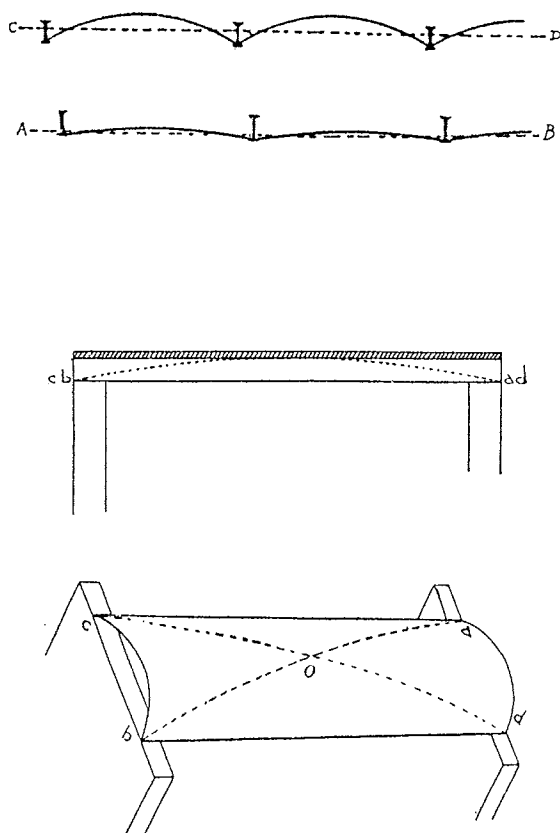


Figura 7.
Estudio del incremento de resistencia en unforjado de vigas metálicas y bóvedas tabicadas (Guastavino, *Essay*, 1893)

ejemplo, estudia el incremento de resistencia que se obtiene en unforjado de vigas metálicas y bóvedas tabicadas debido a la formación de arcos de descarga diagonales, Figura 7, discute la posibilidad de resistir de una bóveda tabicada de cañón agrietada, por el mismo mecanismo, Figura 8, o, analiza la necesidad de los tabiques transversales para resistir cargas puntuales, Figura 9.

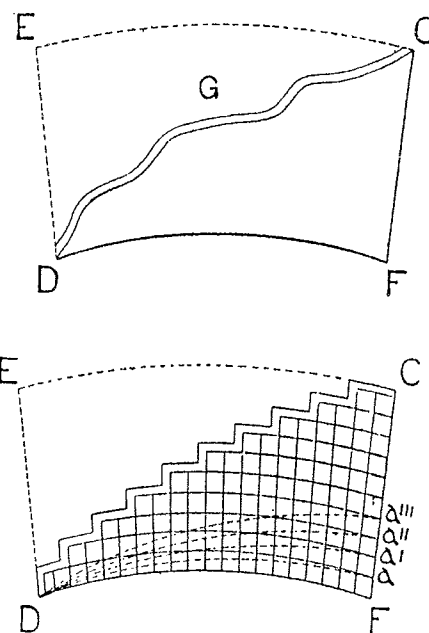


Figura 8.
Mecanismo resistente de una bóveda tabicada de cañón agrietada (Guastavino, *Essay*, 1893)

Pero el texto está lleno de incoherencias fruto de querer aplicar su teoría cohesiva. Así, tras haber deslumbrado al lector por una observación penetrante sobre un aspecto del comportamiento estructural de algún elemento, incurre de nuevo en contradicciones o hace afirmaciones dudosas.

La teoría y la práctica

Tras este examen de la teoría de bóvedas de Guastavino, muchas veces incorrecta y con numerosas contradicciones se podría pensar cómo es posible que fuera, con su hijo, uno de los más grandes constructores de bóvedas y cúpulas de fábrica. La enorme variedad de soluciones

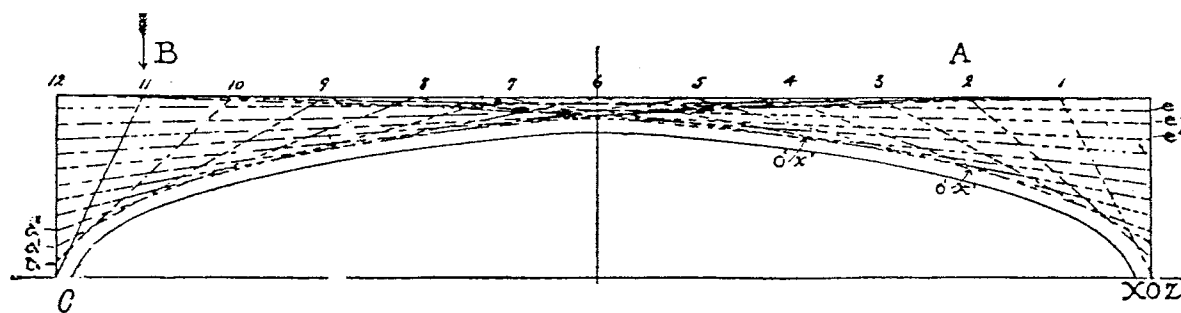


Figura 9.
Necesidad de tabiques transversales para resistir cargas puntuales (Guastavino, *Essay*, 1893)

constructivas, el ingenio y la maestría que demuestran, la audacia de proyectar cúpulas con formas sin precedente, todo ello contrasta con el carácter, ciertamente algo tosco, de la teoría. ¿Cómo es esto posible?

En mi opinión la razón es la siguiente. Por un lado Guastavino trata de pensar dentro del marco de referencia del monolitismo, la cohesividad, la resistencia a tracción y flexión: es el marco que le ha sido dado en la época en que vivió, la segunda mitad del XIX, la época del desarrollo de la teoría de la elasticidad, dentro de la que se incorporan con comodidad los conceptos anteriores de Espie (cámbiese monolitismo por continuidad, homogeneidad, isotropismo).

Por otro lado Guastavino es un gran constructor y arquitecto de bóvedas. Posee la intuición que nace del conocimiento de que el problema crucial en el proyecto de las fábricas no es la resistencia sino la geometría. Es la antigua tradición del cálculo de estructuras. Hay una contradicción evidente entre ambas matrices de pensamiento y la «esquizofrenia» consiguiente se manifiesta en la expresión verbal pero no en la obra construida que es la mejor prueba de la maestría práctica y teórica de Guastavino.

Realmente, para proyectar una cúpula de fábrica no hace falta saber muchas cosas: hay que poder calcular aproximadamente los empujes (para esto bastan las fórmulas anteriores) para poder dimensionar los contrarrestos, tirantes o anillos; y hay que identificar el punto de aparición de las tracciones para disponer tabiques, relleños, etc., que permitan el «escape» de los esfuerzos fuera de la cáscara tabicada o, en el caso de las cúpulas, anillos que permitan anular o variar la dirección de los esfuerzos. Todo lo anterior está relacionado estrechamente con la forma geométrica de las bóvedas y el propio Guastavino afirma: «el empuje depende de la forma y no del material».

Rafael Guastavino Expósito

Rafael Guastavino Expósito trabajó con su padre en la empresa desde los quince años de edad. Recibió, pues, una formación «medieval» viviendo y trabajando con su padre como los aprendices medievales lo hacían con su maestro. Simultaneó esta tarea con estudios sobre arte, arquitectura y estructuras que realizó de manera autodidacta. En base a la documentación existente pueden atribuírsele tres innovaciones en cuanto al proyecto de cáscaras delgadas de fábrica:

- fue el primero en aplicar de forma sistemática la teoría de la membrana a la hora de calcular los esfuerzos internos en bóvedas tabicadas, en particular en las cúpulas;
- ideó un sistema de proyecto de la directriz de las

cúpulas para evitar la aparición de tracciones basado en la teoría de la membrana;

- realizó, al parecer, una de las primeras patentes de cerámica armada (con casi cincuenta años de antelación a Dieste), y aplicó esta técnica cuando lo consideró necesario.

Guastavino Expósito no realizó ninguna publicación, aunque sí dio varias conferencias.¹⁸ De hecho, le tocó vivir la decadencia del modo de construcción de fábrica, que había aprendido y practicado desde niño. Para mantener la empresa, debió investigar con las posibilidades cromáticas de los ladrillos y, sobre todo, realizó una investigación pionera sobre materiales acústicos colaborando con el mejor especialista de la época W. C. Sabine. En los años 1930, con el auge de la construcción de cáscaras delgadas de hormigón intentó competir con éstas, y en el Archivo Gustavino de la Avery Library se conservan documentos y recortes que atestiguan un interés activo. Finalmente, construyó una cúpula tabicada para un planetario (el Planetario Buhl en 1938) aunque desde Dischinger se venían construyendo de hormigón armado. Pero ya no era la época de la construcción de fábrica y la empresa vivió sus últimos años de los materiales acústicos y de construir bóvedas para los últimos edificios historicistas, cuya construcción se prolongó en América hasta los años 1960.

Análisis de membrana

El análisis de membrana (esto es buscar una solución de equilibrio con los esfuerzos contenidos dentro de la superficie media de la cáscara) de cáscaras de fábrica fue propuesto por primera vez por Rankine (1858) que dio la solución analítica para cúpulas de revolución. Schwedler (1866) desarrolló un método analítico para cúpulas de barras que puede extrapolarse a cáscaras. El primer método gráfico fue propuesto por Eddy (1878), Figura 10.

La idea es sencilla: dividida la cáscara en anillos horizontales se calculan sus pesos y se dibujan las fuerzas correspondientes, en orden, sobre una línea vertical. Se trazan rectas horizontales por el extremo de cada una de las fuerzas. Finalmente, por el extremo superior de la recta de fuerzas se trazan paralelas a las tangentes a los extremos inferiores de cada uno de los anillos. Cada triángulo representa el equilibrio de fuerzas de un anillo. La recta inclinada representa la integral de todas las N_ϕ a lo largo del corte; para obtener su valor basta con dividir su magnitud (medida sobre el dibujo en escala de fuerzas) por la circunferencia de corte. La recta horizontal representa la integral de los empujes horizontales en cada corte. Las diferencias entre estas fuerzas horizontales tienen que ser compensa-

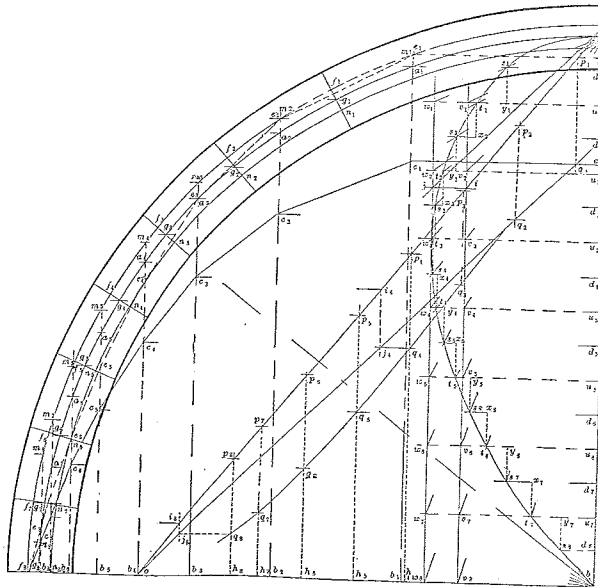


Figura 10.
Análisis gráfico de membrana de una cúpula (Eddy, 1878)

das por las N_θ y es posible calcularlas en base a una fórmula algebraica.

Eddy observa que, a partir de una cierta altura (unos 52° a partir de la clave para una cáscara semiesférica) las N_θ se vuelven de tracción. El método permite calcularlas, pero Eddy advierte que, en el caso de una cáscara de fábrica el material no resistiría las tracciones y la superficie de empujes no tiene más remedio que separarse de la superficie media, manteniéndose constante, a partir de este momento, el empuje horizontal. El método de Eddy fue recogido por Föppl (1881), sin citarle, y más tarde por Dunn (1904), Figura 11.¹⁹ Este último publica más tarde, en 1908, un artículo sobre construcción de cúpulas que tuvo gran difusión, donde, además se comentan las obras de los Guastavino.

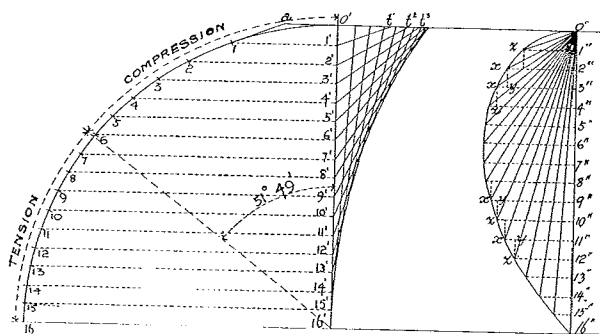


Figura 11.
Diagramas de Dunn, basados en el método de Eddy (Dunn, 1904)

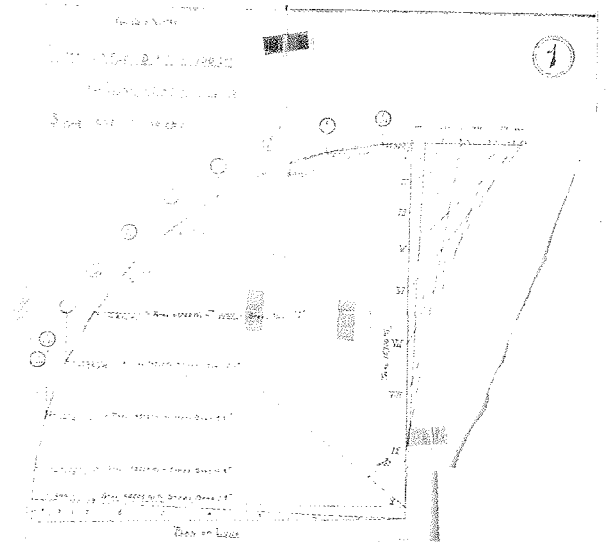


Figura 12.
Aplicación del método de Eddy a una cúpula de 100 m de diámetro. (Archivo Guastavino. Avery Library)

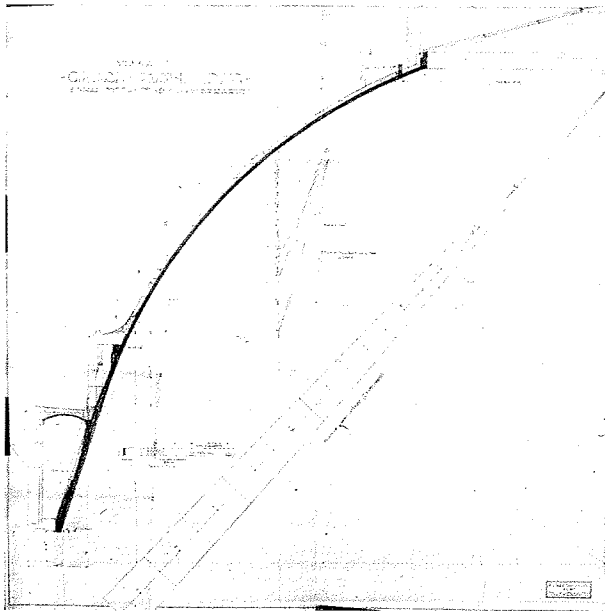


Figura 13.
Cálculo de la forma de equilibrio sin tracciones de una cúpula.
Girard Trust Company, 1905-1907. (Archivo Guastavino. Avery Library)

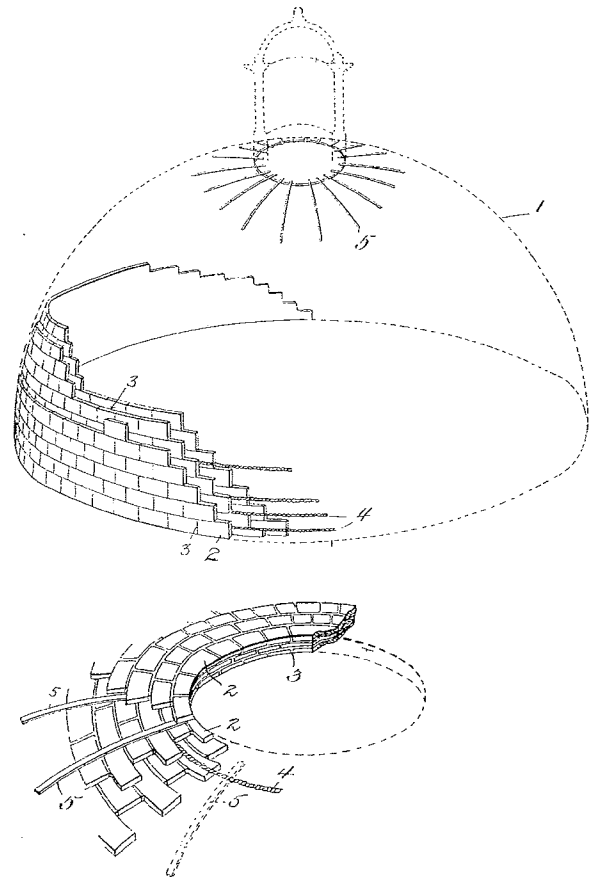


Figura 15.
Disposición de armaduras metálicas en cúpulas metálicas
(Patente Guastavino, 1910)

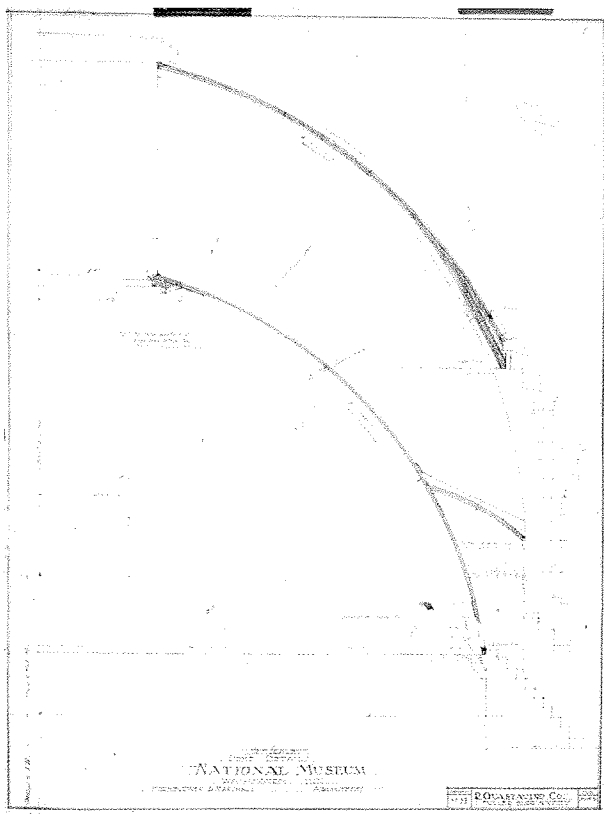


Figura 14.
Doble cúpula, para el National Museum de Washington, mos-
trando el estudio de la geometría y la colocación de zunchos y
bóvedas y pesos de contrarresto. (Archivo Guastavino. Avery
Library)

La observación de Eddy, recogida por Dunn, de que a partir del punto de aparición de las tracciones el empuje se mantenía constante, suministró la idea para un método de proyecto de cúpulas sin tracciones. La parte superior era un casquete esférico y, a partir, del citado punto el diagrama de fuerzas permite trazar, aproximadamente (en realidad habría que iterar), la forma de la cúpula sin tracciones, Figura 13.

Cerámica armada

La técnica gráfico-analítica de Eddy permitía calcular de manera sencilla las resultantes de tensiones N_φ , N_θ en una cúpula de revolución. De esta manera se podían localizar las zonas traccionadas y disponer armaduras metálicas. Como se ha visto los Guastavino trataban de evitar en lo posible la aparición de tracciones disponiendo zunchos a una altura conveniente, colocando bovedillas de estribo, o modificando la forma de la cúpula, Figura 14. Pero en ocasiones es inevitable la aparición de ciertas tracciones y flexiones: este es el caso de la zona próxima a las linternas. Por ello, Guastavino Expósito estudió

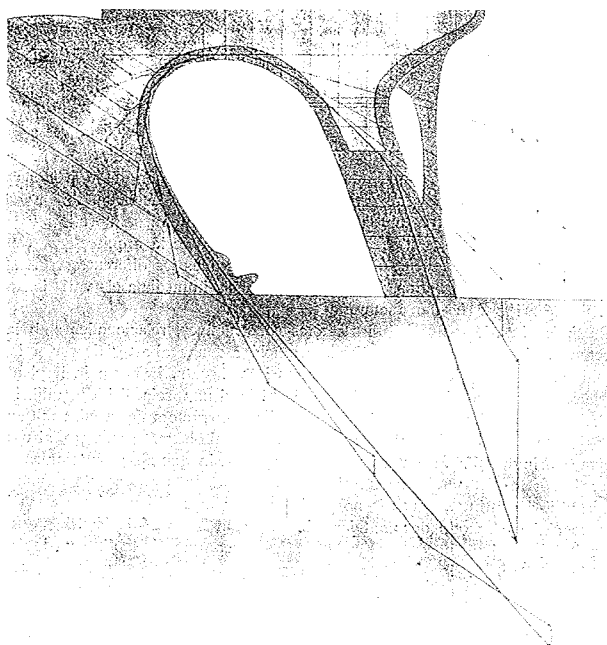


Figura 16.
Cálculo gráfico de Gaudí para las columnas del parque Güell
(Rubió, 1913)

el problema y, finalmente, patentó un procedimiento en 1910, Figura 15.

Los análisis de equilibrio de Gaudí

Gaudí no publicó apenas ningún escrito y, por tanto, sólo tenemos referencias indirectas de sus ideas sobre el proyecto de estructuras. Sí sabemos qué métodos desarrolló y aplicó. En el artículo de Rubió (1913) se describen estos métodos y la importancia que tenían en el proyecto.

Gaudí realizó siempre estudios de equilibrio, con las líneas de empuje contenidas dentro de la fábrica, tabicada o no. Pero también investigó con otros materiales, como el hierro, el hormigón o la cerámica armada.

Las herramientas empleadas eran la estática gráfica, Figura 16, para los casos sencillos, y los modelos colgantes para el proyecto de edificios. Empleó estos modelos, por ejemplo, para el proyecto de la iglesia de la colonia Güell, Tomlow (1989).

El análisis elástico: Domenech, Bayó, Terradas

Como se ha visto la Tabla de G. Lanza al final del *Essay* de 1893 supone, probablemente, la primera evidencia del cálculo elástico de un arco tabicado. Para entender la aparición y desarrollo del análisis elástico de bóvedas

tabicadas, hay que considerar el contexto de la evolución de la teoría del arco de fábrica.

La primera teoría científica de bóvedas que se desarrolló en los siglos XVII al XIX consideraba la fábrica como un material rígido unilateral (que no resiste tracciones). Los análisis eran de equilibrio o de rotura, pero siempre la condición era que la línea de empujes, la trayectoria de las cargas, debía estar contenida con suficiente seguridad dentro del arco. No se hacían suposiciones sobre condiciones de contorno, tales como empotramiento de los apoyos,... y tampoco se hacían otras afirmaciones sobre el material, además de su poca o nula resistencia a tracción. En estas condiciones, la posición de la línea de empujes quedaba indeterminada y se aplicaba, como método de garantizar la seguridad, la condición de poder encontrar una línea de empujes en equilibrio con las cargas contenida dentro del tercio central (ver por ejemplo, Rankine, 1858).

La indeterminación en la posición de la línea de empujes, debida al hiperestatismo de los arcos, se consideró un defecto de la teoría y, desde, circa 1860 se planteó la posibilidad de realizar un análisis elástico de los arcos de fábrica. De hecho, desde 1850 en los manuales de ingeniería aparecía la distinción entre «arcos rígidos» (de fábrica de piedra o ladrillo) y «arcos elásticos» (de madera o hierro).

El carácter de la fábrica, heterogéneo, anisótropo y unirresistente, hizo que los ingenieros tardaran unos treinta años en decidirse a aplicar el cálculo elástico a los arcos de fábrica, hacia 1880. Era la época del apogeo de la teoría elástica que tenía el marchamo de la precisión, la elegancia matemática y la modernidad. A finales del siglo XIX la teoría moderna, y «correcta», del arco de fábrica era la teoría elástica. Los métodos clásicos de equilibrio y rotura, aunque se siguieron aplicando, pasaron a formar la «antigua teoría de bóvedas». Así, pues, parecía lógico aplicar también los métodos elásticos a las bóvedas tabicadas.

En España, las contribuciones sobre el cálculo de bóvedas tabicadas son muy escasas. Ya se han citado las menciones indirectas de Bergós a los métodos de Gaudí. La primera publicación en la que se discute la necesidad de considerar la resistencia a flexión de las bóvedas tabicadas es la de Domenech (1900). Para Domenech no hay duda que la única explicación del éxito de las delgadas bóvedas tabicadas proviene de su capacidad de resistir flexiones que puede llegar a anular el empuje horizontal:

El secreto mecánico de la construcción de estas bóvedas ... está en no limitar el cálculo de los mismos a la resistencia al esfuerzo de compresión de los materiales empleados, sino aprovechar también las resistencias a la tensión y al esfuerzo transversal que ofrecen nuestros ladrillos auxiliados por los morteros de cal o cemento.

Utilizando estas dos resistencias pudo atreverse el constructor catalán a sujetar sus bóvedas a cargas incompresibles en otro ... siempre con pequeño empuje horizontal en sus apoyos y hasta algunas veces reduciéndose éste a cero.

De nuevo aparece la idea del monolitismo rígido de Espie, el mito de la ausencia de empujes.

Después, Domenech hace un análisis lúcido del funcionamiento de los arcos tabicados tomando como ejemplo el caso de una carga uniforme, caso para el que la línea de empujes es una parábola. Observa que si la directriz del arco coincide con la de la línea de empujes, sólo habría compresiones, pero como se aparta «por lo general la forma de la directriz de la bóveda de la de la línea de presiones, es preciso recurrir a la fuerza tensiva del ladrillo y a la resistencia [a tracción] de los materiales de unión». A continuación explica la forma de hallar los momentos flectores y los esfuerzos cortantes y normales, para una línea de empujes dada. Finalmente, discute el problema de la posición de la línea de empujes, considerando la posibilidad de la formación de grietas («juntas de rotura») en el arco, Figura 17.

El dibujo de Domenech muestra las líneas de empujes fuera de la fábrica y produciendo flexiones. Esta situación no es posible que se mantenga mucho tiempo debido a la escasa resistencia a tracción de la fábrica y, sobre todo, a su carácter frágil, a la posibilidad de formar grietas con muy poca energía. De hecho, Domenech comete un error muy frecuente: identifica como estructura sólo la bóveda, olvidándose de los rellenos de los arranques y de los tabiquillos transversales o lengüetas. Estos elementos *son también estructura* y ofrecen caminos alternativos de los empujes a los contrarrestos (estribos o muros de fábrica, una viga horizontal metálica sujetala por tirantes, etc.). De hecho, posibilitan la resistencia de sobrecargas alternadas y cargas móviles como ya indicó Guastavino en su *Essay*.

Consideraciones análogas en cuanto a la resistencia a flexión y la consiguiente reducción del empuje se recogen en el apartado «Procedimientos de cálculo» del artículo de Martorell (1910):

Los procedimientos de mecánica gráfica utilizados generalmente, aplicados a los arcos de ladrillo y de un modo especial a las bóvedas tabicadas, dan resultados más desfavorables de los que en realidad corresponden ... La cohesión, la rigidez de las bóvedas tabicadas, disminuye en gran manera su empuje y a la vez permite darles formas inverosímiles, tal si fueran láminas metálicas.

Alude a las distintas posiciones de la línea de empujes e, implícitamente, a la aparición de flexiones, resaltando la necesidad de realizar ensayos que permitan cal-

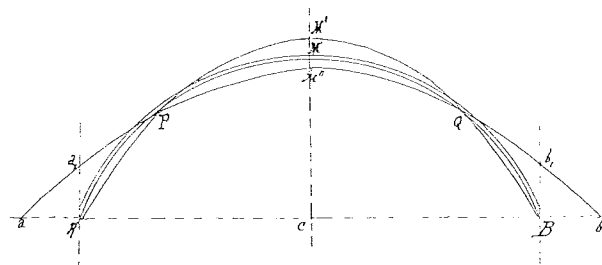


Figura 17.

Posibles posiciones de la línea de empujes en arco tabicado escazcano (Domenech, 1900)

cular «los coeficientes que se usen en el cálculo para evaluar la resistencia a la flexión y los esfuerzos transversales de las bóvedas tabicadas».

Jaime Bayó (1910) es el primero en proponer el análisis elástico de las bóvedas tabicadas. En su artículo las asimila a arcos metálicos (biarticulados), criticando el empleo de los métodos para el cálculo de arcos de dovelas:

[A] calcular esta bóveda [tabicada] ... sujetándola a la curva de presiones de la bóveda dovelada, nace un error, que es suponer que sólo trabajan a la compresión, y no es así, puesto que trabajan también a la tensión, siendo cual lámina metálica sujeta a la flexión.

Para Bayó las bóvedas tabicadas empujan, pero este empuje es el del arco biarticulado elástico correspondiente.²⁰ Se trata, pues, de hallar el lo que llama el «funicular de las fuerzas elásticas», esto es, la línea de empujes que, además de estar en equilibrio con las cargas, cumple las condiciones de compatibilidad elástica de deformación. Bayó da las fórmulas con las integrales usuales y, luego, explica un procedimiento gráfico de resolución, aplicándolo primero a arcos simétricos de espesor constante o variable, y después a arcos asimétricos. Explica también cómo calcular las tensiones de compresión y tracción, y cita los ensayos de resistencia de Guastavino como referencia a la hora de considerar los siguientes valores de tensiones admisibles: compresión 1,5 N/mm², tracción 0,4 ó 0,5 N/mm² y cortadura 0,6 N/mm². El artículo termina con algunas consideraciones sobre el proyecto de bóvedas tabicadas en las que recomienda ajustar el espesor (el número de hojas) a las tensiones de flexión. Observa que en el caso de las bóvedas rebajadas se puede calcular el empuje como si fueran de dovelas, trabajando sólo a compresión, pero que si son peraltadas es preciso adaptar su forma a la de la línea de empujes. Termina el artículo exponiendo un método para proyectar bóvedas tabicadas de cualquier forma, Figura 18:

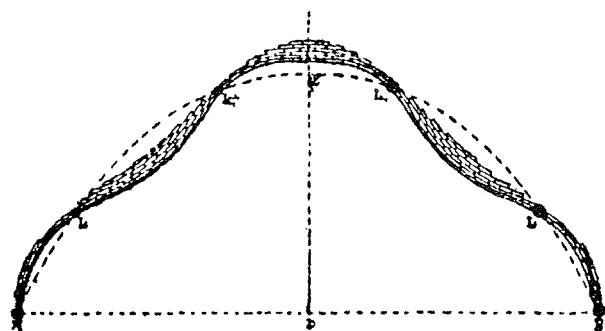


Figura 18.
Bóveda tabicada de forma singular (e imposible en la práctica) donde los espesores se proporcionan a los momentos (Bayó, 1910)

Si ... se quieren construir bóvedas equilibradas o de igual resistencia, que respondan al proyecto sugerido por la imaginación del artista, se procederá como en la figura ... en que después de determinar el funicular de las fuerzas elásticas, se dan a la bóveda espesores relacionados con los momentos.

No tenemos noticia que de que se haya construido nunca una bóveda tabicada (de cualquier otra fábrica), sin armar, con esta forma y espesor, pero el dibujo muestra, mejor que ninguna otra imagen, la fe en la resistencia a tracción, en el cálculo elástico y en las propiedades cohesivas de las bóvedas tabicadas.

Finalmente, hay que hacer notar que el cálculo del arco tabicado corresponde al caso más elemental de estructura tabicada. Bayó no menciona ni siquiera el cálculo de formas más complejas y muy habituales: bóvedas vaídas, bóvedas de cañón con lunetos, bóvedas de arista y cúpulas. Para el cálculo de los esfuerzos en estos casos la única aproximación viable era el cálculo de equilibrio mediante estática gráfica o modelos colgantes. Como se ha visto ambas técnicas fueron empleadas por primera vez por Gaudí.

Consolidación del enfoque elástico-cohesivo. Bóvedas «imposibles de calcular»

Las ideas cohesivas formuladas primero por Espie, recogidas, ampliadas y difundidas por Guastavino, aplicadas después al cálculo elástico, se convirtieron en un dogma. Así, en su conocido libro *Filosofía de las estructuras*, de 1910, y que tuvo gran difusión en España, Cardellach encuadra a las bóvedas tabicadas dentro de la construcción cohesiva, resalta la capacidad de resistir flexiones²¹ y, como Bayó, insiste en la infinita variedad de formas que pueden conseguirse.

Esteve Terradas, gran ingeniero y matemático, fue el primero en intentar un análisis elástico de una bóveda tabicada más compleja, una bóveda de escalera. La aportación de Terradas ha sido analizada en detalle por Rosell y Serrà (1987). En este contexto hay que resaltar que el estudio de Terradas tuvo su origen en un encargo de Puig y Cadafalch, en 1919, con el fin de resolver el problema que entonces planteaba el cálculo de las bóvedas tabicadas, pues, como dice Rosell, «las bóvedas de siempre, construidas por los albañiles “a sentimiento”, eran consideradas como imposibles de calcular». Terradas reunió sus croquis, anotaciones y cálculos en una libreta, la «llibreta de la volta».²²

Terradas intenta realizar un análisis elástico de la bóvedas y examina problemas elásticos que el conocía muy bien, en particular el de pandeo. Fracasa en su intento. El planteamiento de la ecuaciones de equilibrio elástico para una estructura espacial como una bóveda de escalera a montacaballo es muy complejo. No hay solución exacta y el empleo de los métodos aproximados supone tal cantidad de cálculos que no puede hacerse sin la ayuda de un ordenador. Terradas sigue trabajando en el tema y vuelve sobre él en su artículo de 1921 para la Enciclopedia Espasa. En el año 1927 da una conferencia que luego se publica en forma de libro sobre «La estabilidad geométrica en estructuras elásticas».²³ Se trata de un libro sobre teoría elástica sin ningún ejemplo de aplicación.

El fracaso de Terradas tuvo como consecuencia reforzar aún más la idea de la imposibilidad de calcular las bóvedas tabicadas. Josep Goday en su discurso de 1934 ante la Acadèmia Catalana de Belles Arts de Sant Jordi, realiza un repaso histórico del cálculo de las bóvedas tabicadas. Acepta las ideas cohesivas de Guastavino y coincide con Bayó y Terradas en que el único enfoque correcto es aquel que considera las bóvedas tabicadas como delgadas láminas continuas elásticas, dentro de la teoría elástica:

Afortunadamente, nuestras bóvedas tabicadas reúnen el máximo de condiciones para adaptarse a la nueva teoría [elástica]. Estas bóvedas se comportan como verdaderas placas metálicas curvas en forma de arco ... Son bóvedas verdaderamente elásticas.

Al final del artículo Goday discute brevemente el análisis de membrana, si bien no parece apreciar que se trata de un análisis de equilibrio en el que no intervienen las características del material. La teoría de membrana, aunque como se ha visto data de la segunda mitad del XIX, se popularizó en Europa a partir de los años 1930, principalmente gracias a los trabajos teóricos y a las obras del ingeniero alemán Franz Dischinger, empleando cáscaras delgadas de hormigón armado.

Por tanto, se confirmaba la idea de que las bóvedas tabicadas sólo se deben calcular como elásticas y, si esta tarea presentaba dificultades insuperables, las bóvedas eran imposibles de calcular. Eduardo Torroja en su libro de 1956 abunda en esta opinión al hablar de la bóveda tabicada, «tan maravillosa en sus realizaciones, que difícilmente alcanzan los actuales conocimientos teóricos a explicar y medir su fenómeno resistente, genialmente intuido por constructores [ya] desaparecidos».

Bassegoda en sus numerosas aportaciones sobre la construcción tabicada (véase la Bibliografía al final del libro) realiza consideraciones parecidas y, muy recientemente, el profesor J. L. González consideró necesario realizar un ensayo de carga de una escalera con bóveda tabicada para estimar con fiabilidad su resistencia.

La práctica del cálculo

Como apuntó muy acertadamente Rankine (1858) en el ensayo introductorio de su libro de mecánica aplicada, si la pregunta del científico es «qué quiero saber», la del técnico es «qué quiero hacer». La insuficiencia teórica, real o supuesta, nunca ha detenido a los constructores que han manejado en cada momento las herramientas disponibles. Así, mientras los teóricos discutían sobre la imposibilidad de calcular las bóvedas tabicadas éstas se seguían construyendo y los arquitectos o ingenieros realizaban determinados cálculos para determinar las dimensiones de los elementos principales: el espesor de las bóvedas, y la dimensión de los sistemas de contrarresto (sean macizos de fábrica, tirantes o zunchos de hierro, vigas de hormigón, etc.).

Que los constructores pensaban que las bóvedas tabicadas empujaban queda demostrado por la existencia, desde siempre, de estos sistemas de contrarresto.²⁴ Guastavino realizaba cálculos y, como se ha visto, empleaba las fórmulas adecuadas aunque las hipótesis que originaban las fórmulas estaban en frontal oposición a su teoría cohesiva. Luis Moya (1957) el último gran constructor de bóvedas tabicadas reconoce la insuficiencia del cálculo debido a la falta de datos sobre las constantes elásticas de las bóvedas tabicadas, pero después realiza, o manda realizar, cálculos de equilibrio en base a líneas de empujes que le bastaron para proyectar y construir sus asombrosas bóvedas.

Bosch (1947) idea un ingenioso sistema (inspirado, sin duda, en los antiguos manuales de la vieja teoría de bóvedas) para calcular el empuje de las bóvedas vaídas tabicadas, imaginando la formación de nervios cruceros virtuales sobre los que apoyarían a su vez unos arcos elementales producidos dando cortes paralelos a los arcos del contorno. De nuevo, es un método de equilibrio

que busca encontrar un estado posible de compresiones dentro de la fábrica.

Bergós (1936, 1953, 1965) dedicó varios decenios a investigar las propiedades mecánicas de los muros y bóvedas tabicadas. Realizó ensayos sobre arcos tabicados de varios tamaños (hasta 3,20 m de luz) tratando de justificar la aplicación de la teoría elástica.²⁵ Pero en los ejemplos que aparecen en sus libros emplea, de nuevo, métodos gráficos de líneas de empujes, esto es, métodos de equilibrio.

Pereda Bacigalupi (1951) publicó uno de los últimos libros sobre cálculo de bóvedas tabicadas. Como Bayó supone los arcos biarticulados, sobre apoyos rígidos, y los calcula con las fórmulas habituales de los arcos elásticos. Aunque lleven tirante no introduce su deformación en el cálculo, con gran astucia pues, como se ha visto, esto conduciría a unas tensiones de flexión importantes. De hecho, aunque Pereda realiza un cálculo elástico no pretende contar con la resistencia a flexión de la bóveda tabicada. Explícitamente busca un espesor tal que la línea de empujes elásticos esté contenida dentro del tercio central. Para ello reduce las tensiones admisibles de tracción Pereda muestra un conocimiento de las propiedades del material superior a los anteriores predecesores en el cálculo elástico.

En la actualidad se ha aplicado el Método de los Elementos Finitos (MEF) al análisis de estructuras de bóvedas tabicadas. Gulli (1993, 1994, 1995) ha hecho ensayos sobre bóvedas de cañón y ha realizado, después, un análisis elástico de MEF. El MEF, como el cálculo elástico tradicional, asimila la fábrica a un continuo al que atribuye ciertas propiedades elásticas y tiene que prefijar unas condiciones rígidas de contorno (las condiciones en los apoyos tienen que ser establecidas). Estas afirmaciones de compatibilidad y sobre el material, junto con las de equilibrio estático, forman un sistema de ecuaciones que da una solución única. Este enfoque presenta varios problemas. En primer lugar, la resolución del sistema es muy sensible a pequeñas variaciones en las condiciones de contorno. Un pequeño descenso o giro, por ejemplo, en uno de los apoyos, aunque imperceptible a la vista, conducirá a una variación notable del sistema de esfuerzos internos (y el analista puede usar su programa de MEF para verificar este aserto). En segundo lugar, la fábrica tabicada dista mucho de ser un continuo y está, frecuentemente, agrietada. El empleo de programas de MEF que permiten un análisis no-lineal, por supuesto mejora el modelo, pero éste sigue siendo muy sensible a las variaciones en las condiciones de contorno, a la historia de carga de la estructura, a la formación de grietas en zonas inesperadas, etc. En resumen, el resultado de un análisis elástico o de MEF puede que sea poco significativo, o no lo sea en absoluto, a la hora de entender el

funcionamiento resistente de la estructura tabicada o de fábrica en cuestión.

La bóveda tabicada como bóveda de fábrica

La fábrica es un material heterogéneo que resiste bien la compresión, mal la tracción y en el que el rozamiento entre sus partes impide en la mayoría de los casos el deslizamiento. Así, las estructuras de fábrica resisten las cargas mediante esfuerzos de compresión que, para que no haya tracciones, tienen que estar contenidos en su interior. Finalmente, las tensiones de compresión en las fábricas son muy bajas, tanto, que los fallos de resistencia son muy raros.

En otro orden de cosas, las estructuras de fábrica se adaptan a las pequeñas variaciones en las condiciones de contorno formando grietas. Las grietas pueden variar a lo largo del tiempo (algunas son estacionales, otras aparecen al variar de nuevo las condiciones de los apoyos). Las grietas no son peligrosas; es más, es la capacidad de formar grietas la que da plasticidad a estas estructuras. Sí es peligrosa la existencia de movimientos que crezcan progresivamente. La estructura se distorsiona y, puede ocurrir, que la forma muy distorsionada no sea ya estable, como lo era la original. Este tipo de fenómenos se suele deber a procesos de asentamiento o a cambios en las condiciones de las cimentaciones.

Las anteriores afirmaciones se pueden hacer también para las bóvedas tabicadas. La resistencia a tracción que dan los ensayos no es despreciable en relación con la de compresión, pero ningún constructor sensato se fiaría de ella. En primer lugar, la fábrica es un material frágil y esto, en un sentido técnico, significa que el gasto energético para formar superficies de fractura, grietas, es muy pequeño. (Basta observar el modo de partir las piedras en una cantera o de derribar los tabiques en una demolición, a base de martillazos. A nadie se le ocurriría tratar de partir un material tenaz, como el acero o la madera, por este método.)

Por otro lado, en una estructura hiperestática de fábrica la formación de grietas es inevitable, pues siempre habrá pequeños movimientos de los apoyos, variaciones térmicas, defectos de construcción o de fraguado, etc. Las tensiones de tracción sólo se mantienen en elementos isostáticos. Por ejemplo, en las grandes gárgolas de granito del gótico, con hasta unos 2 m de vuelo, la tensión de tracción en el arranque puede ser de 1 N/mm^2 , que no es despreciable, y las gárgolas han permanecido durante siglos. Esto es posible porque la gárgola es una ménsula isostática, puede moverse libremente, aunque el muro o botarel se desplace. Si el extremo de la gárgola estuviera apoyado en algo rígido, si fuera una viga empotrada apoyada hiperestática, con seguridad se partiría. Heyman (2001) discu-

te, en este mismo sentido, una observación de Galileo sobre una columna apoyada en dos o tres apoyos.

Las bóvedas tabicadas tradicionales muestran las mismas patologías que las de piedra o rosca de ladrillo. Resulta interesante que la existencia de estas grietas no preocupase a los antiguos constructores más que cuando estaban «vivas» y crecían.

Por supuesto, la apertura de las grietas depende de la magnitud de los movimientos. Si los movimientos son pequeños, las grietas pueden tener el espesor de un cabello o estar aparentemente cerradas por la elasticidad de la fábrica, pero existen. El empleo de tirantes o zunchos metálicos reduce extraordinariamente las deformaciones en relación con las que se producen con los sistemas masivos de contrarresto. (Un giro muy pequeño en la cimentación de un estribo gótico puede producir una deformación apreciable en el arranque de la bóveda situado quizá 20 ó 30 m más arriba.)

Es cierto que la resistencia a tracción permite también una cierta resistencia a flexión. Las bóvedas tabicadas, construidas con morteros de fraguado rápido, pueden resistir al poco tiempo pequeñas cargas móviles: por ejemplo, un albañil puede andar sobre un delgado arco tabicado. La explicación de la resistencia de cargas mayores o por largos períodos de tiempo hay que buscarla en la existencia de otros dispositivos resistentes. Así, las lengüetas o tabiques transversales, o el relleno consistente, que forman la base de un forjado, son en realidad parte de la estructura resistente y permiten soportar cargas móviles de cierta entidad. Las bóvedas de cubierta precisan también de estos dispositivos, como indica Fray Lorenzo, y pueden verse siempre accediendo al bajo cubierta. Los Guastavino, además de usar con maestría los tirantes, zunchos o anillos de hierro, idearon distintos dispositivos con este fin: arbotantes tabicados, bóvedas de contrarresto, regruesamiento del material de cubierta, pesadas cornisas de piedra, etc., que pueden verse en los planos constructivos reproducidos en este libro. El principio es siempre el mismo: bien dar una vía de escape a los empujes cuando sea necesario, bien cargar de manera que aquéllos estén siempre contenidos en la fábrica.

La posibilidad de perforación de una bóveda sin que colapse, que se cita desde los tiempos de Espie como una característica de las estructuras cohesivas, la poseen también otras bóvedas de fábrica. Con cierta frecuencia un pináculo cae de un botarel y perfora una bóveda gótica de crucería sin que ésta colapse. Lo mismo ha ocurrido al caer campanas del armazón de madera sobre la bóveda inferior de piedra. Los bombardeos de la primera mundial agujerearon algunas bóvedas de la catedral de Reims, sin que éstas cayeran.

La resistencia a compresión de las bóvedas tabicadas es menor que la de otras fábricas, por su tendencia a

deshojarse. Por ejemplo, al formarse las grietas en un arco tabicado, el apoyo de articulación se produce sobre una de las hojas, que puede empezar a separarse de las otras que no reciben carga. Este defecto puede verse en algunas bóvedas tabicadas tradicionales y se puede apreciar en los ensayos de colapso. Guastavino usó en ocasiones ladrillos machihembrados para evitarlo. En Francia en el siglo XVIII se usaron también ladrillos en forma de grapa o curvados, posiblemente con el mismo fin. Por consiguiente, las bóvedas tabicadas no son adecuadas para grandes cargas. Nunca se emplearon, por ejemplo, para la construcción de puentes (el puente tabicado que aparece en el *Essay* de Guastavino es un puente peatonal).

Finalmente, hay que señalar que los fallos por deslizamiento son también excepcionalmente raros en el caso de las estructuras tabicadas. El rozamiento entre los elementos tabicados, aún despreciando la cohesión (por ejemplo en una grieta), es muy alto.

En conclusión, el carácter «cohesivo» no es una cualidad fundamental del material en cuanto a su comportamiento estructural. La cohesión sólo se emplea durante la construcción. Es el empleo de morteros de fraguado rápido y ladrillos ligeros lo que permite que las bóvedas tabicadas se puedan construir sin cimbra, al aire, usando sólo formas para controlar la geometría. Terminada la bóveda, ésta empuja, se agrieta, funciona exactamente igual que una bóveda de fábrica.

Análisis límite de las bóvedas tabicadas

Las observaciones fundamentales sobre el material «fábrica» que se han citado antes, buena resistencia a compresión (además, con tensiones bajas), mala resistencia a tracción e imposibilidad de fallo por deslizamiento, eran bien conocidas por los ingenieros de los siglos XVIII y XIX que basaron su «antigua teoría» de bóvedas en estas características. El profesor Heyman ha sistematizado estas afirmaciones con el fin de poder englobar la teoría de estructuras de fábrica dentro del marco más general del Análisis Límite. Desde su primer artículo de 1966 hasta la actualidad ha expuesto la teoría aplicándola después a elementos estructurales básicos —arbotantes, cúpulas, bóvedas de crucería, agujas y torres, puentes, etc.— con el fin de aclarar su aplicación (los artículos se han recopilado en Heyman 1995; una exposición de la teoría en Heyman, 1999). En lo que sigue se expondrá brevemente esta teoría.

Se considera la estructura de fábrica formada por un material rígido-unilateral, que resiste compresiones pero no resiste tracciones. Es decir, imaginamos la fábrica como un conjunto de bloques indeformables en contacto seco y directo que se sostienen por su propio peso. Su-

pondremos también que las tensiones son bajas, no habiendo peligro de fallo por resistencia, y que el rozamiento entre las piedras es suficientemente alto como para impedir su deslizamiento.

Estas tres hipótesis dan lugar a los Principios del Análisis Límite de las Fábricas:

- (1) la fábrica presenta una resistencia a compresión infinita;
- (2) la fábrica tiene una resistencia a tracción nula;
- (3) el fallo por deslizamiento es imposible.

La hipótesis (1) va ligeramente en contra de seguridad y se comprobará mediante un cálculo numérico. La suposición (2) va, evidentemente, a favor de seguridad. Finalmente, la hipótesis (3), vuelve a estar en contra de seguridad, si bien los casos de deslizamiento entre piedras son muy raros.

La condición de estabilidad de una fábrica construida con un material que cumpla los principios anteriores exige que la trayectoria de las fuerzas, la «línea de empujes», esté contenida dentro de la estructura; esto es, para cada sección hipotética de la estructura la resultante de las fuerzas debe estar contenida en su interior.

Teorema de la seguridad

En general, la estructura será hiperestática y, en consecuencia, se pueden encontrar infinitas líneas de empujes contenidas dentro de la fábrica, que corresponden a las infinitas situaciones de equilibrio posibles (la línea de empujes no es más que una representación gráfica de las ecuaciones de equilibrio). Si se cumplen los principios del análisis límite enunciados antes se pueden demostrar los Teoremas Fundamentales del Análisis Límite. Nos interesa en particular el Teorema Fundamental de la Seguridad: Dada una estructura, si es posible encontrar una situación de equilibrio compatible con las cargas que no viole la condición de límite del material (esto es, que no aparezcan tracciones) la estructura no colapsará. Aplicado a las fábricas: si es posible dibujar una línea de empujes (o un conjunto de líneas de empujes) en equilibrio con las cargas contenidas dentro de la estructura la estructura no se hundirá.

La potencia del Teorema radica en que la línea de empujes, es decir, la situación de equilibrio, puede ser elegida libremente. Escogida una línea, podremos aplicar las condiciones de seguridad a cada una de las secciones que atraviesa y obtener, de esta forma, un límite inferior para el coeficiente de seguridad geométrico (Heyman, 1982): sabemos que la estructura tiene al menos ese coeficiente de seguridad —en general, sería posible encontrar una línea de empujes que diera una situación más favorable.

El problema de la seguridad de las fábricas es, pues, un problema de estabilidad al vuelco. De los tres criterios fundamentales que debe cumplir una estructura (resistencia, rigidez y estabilidad), es éste último el que gobierna el proyecto de las fábricas: las tensiones son bajas y las deformaciones pequeñas.

El criterio de estabilidad conduce a una visión de las estructuras de fábrica basada firmemente en la geometría: es la forma la que posibilita que las trayectorias de esfuerzos estén siempre dentro de los límites de la fábrica (para una exposición clara y muy detallada de este enfoque, véase Heyman, 1999). Por otra parte, el análisis límite admite las grietas como algo natural. De hecho un agrietamiento que no distorsione excesivamente la forma general de la estructura no reduce su seguridad.

El enfoque del equilibrio

Una de las consecuencias más importantes del Teorema de la Seguridad es que permite el enfoque del equilibrio. Es posible analizar y proyectar estructuras de fábrica simplemente empleando las ecuaciones de equilibrio y sin tener que hacer afirmaciones dudosas sobre el material y las condiciones de contorno. De hecho las únicas afirmaciones sobre el material son las citadas antes, y la única afirmación que se hace sobre las condiciones de contorno es que, si hay movimientos, éstos serán pequeños, de manera que las ecuaciones de equilibrio escritas antes y después de la deformación sean las mismas. (En una estructura seriamente distorsionada respecto a su forma original, pero estabilizada, el análisis se hará respecto a la forma actual distorsionada.)

Los análisis de equilibrio de la «antigua teoría» de bóvedas resultan ser, dentro del marco del Análisis Límite, perfectamente correctos (Huerta, 1990, 2001). Las fórmulas simplificadas de Guastavino padre, los análisis gráficos y el empleo de modelos catenarios de Gaudí, el análisis de membrana de estados de compresión de Guastavino hijo, son correctos. Para hablar con mayor precisión, son «seguros»: una estructura proyectada en base a ellas no se caerá y se puede emplear el mismo enfoque para medir su seguridad. No podría ser de otra manera, pues, de hecho, habían conducido a estructuras que llevan en pie más de cien años y esto es una demostración experimental concluyente.

Más aún, las reglas proporcionales tradicionales de proyecto de bóvedas y estribos (del tipo de las de Fray Lorenzo) también son esencialmente correctas. El problema de la seguridad de una bóveda de fábrica (de piedra, rosca de ladrillo, adobe, tabicada, o de hormigón romano) es un problema de la forma geométrica de la estructura. Las formas estables contienen líneas de empujes en equilibrio con las cargas. Las reglas tradicionales codifican estas formas y su empleo es racional y co-

recto. (Por supuesto estas reglas son particulares para cada tipo de estructura: un estribo gótico no soportaría el empuje de una bóveda romana.)

Conclusión

Las bóvedas tabicadas son bóvedas de fábrica y se comportan estructuralmente de la misma manera. Los métodos de análisis empleados deben respetar las características esenciales de este material y el marco teórico más adecuado es el del moderno Análisis Límite de Estructuras de fábrica. El Teorema de la Seguridad garantiza la corrección de los análisis de equilibrio (gráficos o analíticos) que pueden usarse con ventaja hoy día. La exactitud de un análisis viene dada por la corrección de las hipótesis de partida y no por la herramienta de cálculo empleada: un sencillo análisis gráfico puede ser mucho más exacto que un análisis por ordenador.

El carácter «cohesivo» no es relevante desde el punto de vista estructural. Sí lo es desde el punto de vista constructivo. Permite la construcción sin cimbra, empleando sólo ligeros elementos auxiliares de control de la forma. Las bóvedas tabicadas pertenecen a esta familia de bóvedas que se construyen sin cimbra, que incluye también las bóvedas de rosca de ladrillo bizantinas, las

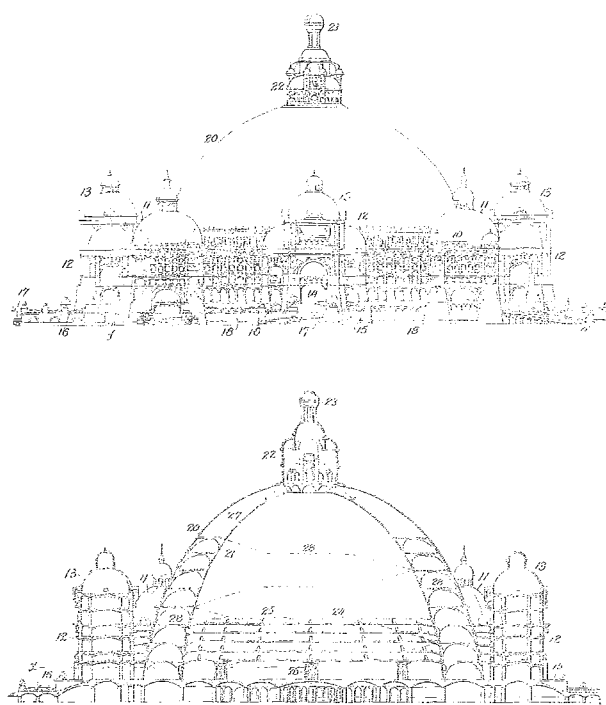


Figura 19.
Último proyecto de Guastavino padre recogido póstumamente en una patente de 1909

de tubos huecos del norte de África, las de hojas inclinadas de Babilonia o Egipto, etc. Las bóvedas tabicadas presentan, además, una cierta resistencia a la flexión que permite el paso de pesos ligeros apenas terminadas, facilitando aún más el proceso constructivo.

La teoría cohesiva de Guastavino es, pues, falsa. Pero hay que tener en cuenta cuando se produjo y qué precedentes tuvo. Guastavino tenía que «pensar», elaborar sus teorías, en el marco de ideas de finales del siglo XIX, poco adecuado para la construcción de fábrica. Esta «esquizofrenia» de pensar de una forma y construir de otra se refleja en las numerosas contradicciones de su *Essay*, como creemos haber demostrado.

No obstante, la teoría cohesiva y su relación casi mística con la naturaleza suministró a Guastavino la energía para llevar a cabo su obra, y le llevaron a una perfección constructiva del sistema tabicado desconocida hasta entonces. Guastavino no es un simple constructor, no es un empresario avisado que exportó y patentó un sistema constructivo que ni siquiera era suyo. Es un arquitecto que quiso llevar la construcción de fábrica a su perfección. Para ello viajó a América, renunció a firmar proyectos y se hizo constructor, y empleó el sistema constructivo que le parecía más adecuado: el sistema tabicado. Que Guastavino era en cierto modo un visionario, cosa no infrecuente a finales del s. XIX, lo demuestran sus escritos de los *Prolegómenos* y se manifiesta en su última patente, presentada en 1905 y aprobada póstumamente en 1909, que no es más que un gran proyecto «ideal» de construcción tabicada, Figura 19.

Notas

1. Véase Collins (1968). Todavía hoy el mejor trabajo escrito sobre Guastavino.
2. He podido observar estas grietas en numerosas ocasiones. Por ejemplo, en la iglesia del Convento de San Francisco en León, las bóvedas tabicadas de cañón con lunetos, de unos 9 m de luz y sólo 8 cm de espesor, presentaban la típica grieta longitudinal en la clave. La media naranja sobre pechinas en el crucero, de también 9 m de luz, presentaba un agrietamiento meridional típico de las cúpulas. No obstante, las grietas eran de décimas de mm y sólo podían observarse desde el trasdós. En la iglesia de Castroverde de Campos, la bóveda de cañón con lunetos, rebajada con perfil elíptico presenta el mismo agrietamiento. Podrían citarse muchos casos más.
3. En el libro de Lemma (1996) se incluye una reproducción facsímil y la traducción al italiano.
4. «Parallele des voûtes ordinaires avec les voûtes plates», Espie (1754): 40-58.
5. «... car je ne suis pas du sentiment de ceux qui croient que ces Voûtes poussent les murs». Espie (1754): 44.
6. Sobre la génesis del libro véase el ensayo de Janet Parks, «Génesis del "Ensayo sobre la construcción cohesiva" de

Rafael Guastavino», pp. ???-??? , del presente libro. Una edición española se publicará en breve: R. Guastavino *Ensayo sobre la construcción cohesiva, con particular atención a la bóveda tabicada* ed. por S. Huerta; traducción G. López. Madrid: Instituto Juan de Herrera/CEHOPU.

7. Esta afirmación de Guastavino parece más que discutible. Ya se ha visto la presencia constante en los tratados españoles desde el siglo XVII. Es, también, un hecho significativo que una parte importante del tratado de Fornés y Gurrea, publicado en Valencia en 1841 (2a. ed. 1857), está dedicado a la construcción tabicada. Fornés usa sistemáticamente bóvedas tabicadas en las especificaciones constructivas de su *Álbum de proyectos* de 1846. Parece, pues, que la construcción tabicada era bien conocida en Valencia a mediados del siglo XIX, por no hablar de las extraordinarias cúpulas tabicadas que existen en la ciudad. En cuanto al resto de España, hay que decir que en el tratado de Ger y Lóbez, publicado en Badajoz en 1869, también se hace explícita la construcción tabicada, al mismo nivel que la de rosca de ladrillo o piedra.
8. Por esa misma época Monier inventa el hormigón armado en Francia en 1861. Después Hennebique difundió por todo el mundo el empleo de este nuevo material, Delhumeau (1999). En América Hyatt realiza los primeros ensayos en 1877, Newlon (1976), y para finales de siglo era un material conocido, Condit (1960). Cuando Guastavino escribe el *Essay* y, sobre todo, cuando escribe, los *Prolegómenos* a principios del siglo XX era evidente que este nuevo material era una buena alternativa constructiva. No obstante, aunque en estos libros se discute la aplicación del hierro forjado, no se hace ninguna referencia al hormigón armado.
9. El profesor Heyman ha llamado la atención en numerosas ocasiones sobre este hecho; véase, por ejemplo, Heyman (1999, 2001). De hecho, las reglas tradicionales dominaron el proyecto de estructuras de fábrica desde la antigüedad, si bien, desde el comienzo del cálculo científico fueron consideradas incorrectas, al no tener, según los ingenieros de la época, un fundamento científico. No obstante se siguieron empleando y aparecen en todos los manuales de construcción de fábrica hasta principios del siglo XX.; para un estudio detallado de los distintos tipos de reglas y su grado de validez, véase Huerta (1990 , 1999).
10. Sobre el desarrollo histórico de la teoría de arcos y bóvedas de fábrica, véase: Heyman (1982), Benvenuto (199) y Huerta (1996).
11. No es de ningún modo una excepción en la historia del desarrollo de las ciencias y de las técnicas. Con alguna frecuencia, la idea motriz, aquella que entusiasma al científico o al artista es falsa, pero el impulso permite desarrollar otras ideas, estas correctas, que suponen un avance en la disciplina en cuestión. Koestler (1964) cita, entre otros ejemplos, el caso de Kepler que, obsesionado toda su vida por la armonía geométrica del movimiento de las esferas, descubrió unas leyes que destruyeron para siempre el ideal geométrico griego del movimiento de los astros.
12. El fenómeno es bien conocido desde la antigüedad. Las primeras interpretaciones de los agrietamientos como re-

- sultado de movimientos de los apoyos aparecen a mediados del siglo XIX. Los primeros estudios sistemáticos se deben al profesor Heyman. Véase, por ejemplo, Heyman (1999).
13. Es interesante comparar los ensayos, y las fotos, con los realizados por Hennebique sobre el hormigón armado. Véase Delhumeau (1999).
 14. El coeficiente de seguridad de 10 aplicado a las fábricas tiene, en realidad, un origen distinto. La resistencia de una fábrica depende de la resistencia de las piedras, de la forma y dimensión de las juntas de mortero, y de la resistencia del propio mortero, como demostraron los ensayos de Tourtay (1885). Así, para sacar coeficientes de rotura habría que ensayar bloques de fábrica de cierto tamaño. Sin embargo, los primeros ensayos se hicieron sobre pequeñas piezas de piedra. Sabiendo que la resistencia de la fábrica sería mucho menor, los ingenieros del XIX tomaban, de forma empírica, como resistencia admisible de la fábrica $1/10$ de la resistencia a rotura de la piedra. Por supuesto, la regla no se aplica a los ensayos que se realizan sobre probetas de fábrica, como es el caso de Guastavino. Este hecho condujo a una confusión considerable en los manuales de ingeniería de finales del siglo XIX y, muchas veces, a valores de la tensión admisible de las fábricas absurdamente bajos.
 15. El libro de Dejardin fue muy popular en la segunda mitad del siglo XIX pues incluía reglas y observaciones de interés práctica. La regla para obtener la variación del espesor del trasdós es más antigua. Se origina en el análisis de equilibrio de La Hire (1695) de un arco semicircular formado por dovelas rígidas sin rozamiento. Para que haya equilibrio, la condición es, precisamente, que el peso de las dovelas, i.e. su espesor, varíe con el inverso del coseno. Frézier fue el primero en proponer en base a esto arcos de sección variable. Después fue habitual en arcos de puente, pero no en arcos de edificios (Huerta, 1990). En el caso de las bóvedas tabicadas, que soportan sobrecargas moderadas, no parece necesario dadas las bajas tensiones de trabajo. No obstante, la opción es lógica si se considera que el problema es de resistencia (aunque no lo sea) como sucede con Guastavino.
 16. La idea fue, de nuevo, sugerida por Frézier que, razonando de forma parecida, afirma que el empuje de las bóvedas esféricas es siempre menor de la mitad que el de las de cañón de la misma directriz y espesor, Huerta (1990).
 17. «No pretendemos dar una fórmula matemática absoluta, sino una práctica, que baste para garantizar la seguridad de la construcción» (*Essay*, 68, 72).
 18. En el archivo Guastavino de la Avery Library, se conserva un mecanoscrito para un artículo de revista de 1929 y el texto de una conferencia de ca. 1914.
 19. La historia de este método resulta interesante. El libro de Eddy se tradujo al alemán, *Neue Constructionen aus der graphischen Statik* (Leipzig, 1880), así, es posible que Föppl lo conociera aunque no lo cite. Dischinger (1928) lo expone como un método gráfico analítico para el cálculo de esfuerzos en cáscaras de forma cualquiera, de nuevo, sin citar origen. A partir de entonces aparece en muchos manuales.
 20. Con buen criterio, cuando el arco lleva tirante calcula su empuje como si fuera biarticulado. El considerar la elasticidad del tirante conduciría a unas tensiones de flexión mucho más altas. Además, construyéndose las bóvedas tabicadas sin cimbra, el tirante se va estirando ya durante la construcción. Ésta seguramente es la explicación de por qué las bóvedas tabicadas atirantadas no están agrietadas.
 21. Cita una serie de ejemplos como prueba, todos ellos tomados de Guastavino (1892), «cuya única y evidente explicación estriba en admitir la elasticidad de las formas tabicadas y en considerar que se verifica en ellas la ley de la flexión, que nos dice cuánto crece una resistencia con el incremento del momento de inercia de la forma correspondiente».
 22. El profesor Rosell me facilitó una fotocopia de esta libreta y tuvo la amabilidad de comentar conmigo distintos aspectos del trabajo de Terradas. Le estoy por todo ello muy agradecido.
 23. E. Terradas. 1927. *De la estabilidad geométrica en estructuras elásticas*. Madrid: Talleres Voluntad. El profesor Rosell me facilitó este libro.
 24. Un caso análogo es de la construcción romana que ha sido considerada como monolítica y sin empujes por algunos arquitectos e ingenieros. Esta idea se contradice con la presencia de grandes masas de hormigón funcionando de estribo, en todos y cada uno de los monumentos abovedados. Suponer que los ingenieros romanos eran ignorantes hasta el punto de realizar gastos enormes de forma inútil contradice, no sólo el carácter romano, acertadamente descrito por Choisy, si no la evidencia histórica. De hecho, las fábricas romanas no resisten tracción, como las tabicadas, y como ellas se agrietan y empujan.
 25. Un caso análogo se produjo con los ensayos a gran escala, con arcos de más de 20 m, realizados por los arquitectos e ingenieros austríacos en 1898. Los ensayos, donde se produjeron colapsos por formación de mecanismos y eran evidentes las rótulas plásticas (idea entonces desconocida), fueron interpretados como una confirmación de la teoría elástica. Para una discusión más detallada, véase Huerta (2001).

Bibliografía

- Bails, Benito. 1796. *Elementos de Matemáticas. Tomo IX. Parte I. Que trata de la Arquitectura Civil*. Madrid: Imprenta de la Viuda de Joachim Ibarra (reimpr. facs. Murcia: C. O. de Aparejadores y Arquitectos Técnicos, 1983).
- Bannister, T.C. 1968. «The Roussillon Vault. The Apotheosis of a "Folk" Construction». *Journal of the Society of Architectural Historians*, 27:163–75.
- Bayó, Jaime. 1910. «La bóveda tabicada». *Anuario de la Asociación de Arquitectos de Cataluña*:157–84.
- Béllidor, B.F. (1729). *La science des ingénieurs dans la conduite des travaux de fortification et architecture civile*. Paris.
- Benvenuto, Edoardo. 1991. *An Introduction to the History of*

- Structural Mechanics. Part II: Vaulted Structures and Elastic Systems*. New York/Berlin: Springer Verlag.
- Bergós Massó, Juan. 1936. *Formulario técnico de construcciones*. Barcelona: Bosch.
- Bergós Massó, Juan. 1953. *Materiales y elementos de construcción. Estudio experimental*. Barcelona: Bosch.
- Bergós Massó, Juan. 1965. *Tabicados huecos*. Barcelona: Colegio de Arquitectos de Cataluña y Baleares.
- Blondel, J.F. 1771–77. *Cours d'Architecture, ou Traité de la décoration, distribution et construction des bâtiments... continué par M. Patte*. Paris: Chez la Veuve Desaint. 6 vols. texto, 3 vols. láminas.
- Bosch Reitg, Ignacio. 1949. «La bóveda vaida tabicada». *Revista Nacional de Arquitectura*: 185–99.
- Cardellach, Félix. 1970. *Filosofía de las Estructuras. Filiación racional de las formas resistentes empleadas en la ingeniería y en la arquitectura histórica y moderna...* Barcelona: Editores Técnicos Asociados (1a. ed. 1910).
- Collins, George R. (1968). «The Transfer of Thin Masonry Vaulting from Spain to America». *Journal of the Society of Architectural Historians*, 27: 176–201.
- Condit, Carl W. 1960. *American Building Art: The nineteenth century. The twentieth century*. New York: Oxford University Press. 2 vols.
- Coppet Berg, Louis de. 1889. *Safe building*. Boston: Ticknor.
- Dejardin, M. 1860. *Routine de l'établissement des voutes ou recueil de formules pratiques et de tables déterminant a priori et d'une manière élémentaire le tracé, les dimensions d'équilibre et le métrage des Voûtes d'une espèce quelconque*. 2a Ed. Paris: Dalmont et Dunod.
- Delhumeau, G. 1999. *L'invention du béton armé: Hennebique 1890–1914*. Paris: Éditions Norma.
- Dischinger, Franz. 1928. *Schalen und Rippenkuppeln*. (4a ed. Handbuch der Eisenbetonbau. VI Band, Zweiter Teil., F. von Emperger (ed.). Berlin: Verlag von Wilhelm Ernst und Sohn.
- D'Olivier. 1837. «Relatif à la construction des voûtes en briques posées de plat, suivi du recherches expérimentales sur la poussée de ces sortes des voûtes». *Annales des Ponts et Chaussées, 1er série*: 292–309, Pl. 129.
- Domenech y Estapá, José. 1900. «La fábrica de ladrillo en la construcción catalana». *Anuario de la Asociación de Arquitectos de Cataluña*: 37–48.
- Dunn, W. 1904. «Notes on the Stresses in Framed Spires and Domes». *Journal of the Royal Institute of British Architects, Third series*, 11 (Nov. 1903 - Oct. 1904): 401–412.
- Dunn, W. 1908. «The Principles of Dome Construction». *Architectural Review*, 23: 63–73; 108–112.
- Eddy, Henry T. 1878. *Researches in Graphical Statics*. New York: Van Nostrand.
- Espie, Comte d'. 1754. *Manière de rendre toutes sortes d'édifices incombustibles, ou Traité sur la construction des voûtes, faites avec des briques et du plâtre, dites voûtes plates, et d'un toit de brique, sans charpente, appelé comble briqueté*. Paris: Duchesne.
- Fontaine, H. 1865. «Expériences faites sur la stabilité des Voûtes en briques» *Nouvelles Annales de la Construction*, 11e. année, pp. 149–159, Plate 45.
- Föppl, August. 1881. *Theorie der Gewölbe*. Leipzig: Felix.
- Fornés y Gurrea, Manuel. 1841. *Observaciones sobre la práctica del arte de edificar*. Valencia: Imprenta de Cabrerizo. (reimpr. facs. Valencia: Librería Paris-Valencia, 1993).
- Fornés y Gurrea, Manuel. 1846. *Álbum de proyectos originales de arquitectura, acompañado de lecciones explicativas*. Valencia: Imprenta de D. Mariano Cabrerizo. (facs. Madrid: Ediciones Poniente, 1982).
- Fornés y Gurrea, Manuel. 1857. *Observaciones sobre el arte de edificar*. Valencia: Imprenta de D. Mariano Cabrerizo. (facs. Madrid: Ediciones Poniente, 1982).
- Forteza Luna, Manuel y Vicente López Bernal. 1998. *Bóvedas extremeñas. Proceso constructivo y análisis estructural de bóvedas de arista* Badajoz: Colegio Oficial de Arquitectos de Extremadura.
- Frézier, A.F. 1769. «De la poussée des voûtes». *La Theorie et la Pratique de la Coupe des Pierres...* nouv. éd. Paris: Charles-Antoine Jombert, 3: 345–413.
- García Berruguilla, Juan. 1747. *Verdadera práctica de las resoluciones de la Geometría...* Madrid: Imprenta de Lorenzo Francisco Mojados (reimpr. facs. Murcia: C. O. de Aparejadores y Arquitectos Técnicos, 1979).
- Ger y Lobe, Florencio. 1915. *Manual de construcción civil*. 2a. ed. Badajoz: La Minerva Extremeña (1a. ed. Badajoz, 1869).
- Goday, Josep. 1934. *Estudi històric i mètodes de càlcul de les voltes de maó de pla* Barcelona: Acadèmia Catalana de Belles Arts de Sant Jordi.
- González Moreno-Navarro, José Luis. 1999. «La bóveda tabicada. Su historia y su futuro». En *Teoría e historia de la restauración. Vol. 1*. Madrid: Munilla-Llería: 237–59.
- Guastavino Expósito, Rafael. 1914?. [Texto de una conferencia]. Mecanoscrito inédito. Guastavino Archives, Avery Library, Columbia University, New York.
- Guastavino Expósito, Rafael. 1929. [Artículo sobre el sistema Guastavino]. Mecanoscrito inédito. Guastavino Archives, Avery Library, Columbia University, New York.
- Guastavino Moreno, Rafael. 1889. «The theory and history of cohesive construction». *The American Architect and Building News*, 26: 218–20.
- Guastavino Moreno, Rafael. 1890. «Cohesive construction. Applications, Industrial sections». *The American Architect and Building News*, 27, nE739: 123–9.
- Guastavino Moreno, Rafael. 1893. «Cohesive construction: its past, present and future». *The American Architect and Building News*, 41, nE922: 125–9.
- Guastavino Moreno, R. 1893. *Essay on the Theory and History of Cohesive Construction, applied especially to the timber vault*. Boston: Ticknor and Company. (1a. ed. 1892)
- Guastavino Moreno, Rafael. *Prolegomenos on the function of masonry in modern architectural structures*. New York: Record & Guide Press, 1896.
- Guastavino Moreno, Rafael. *The function of masonry in modern architectural structures*. Boston: America Printing Co., 1904.
- Guastavino Moreno, Rafael. *Prolegomenos on the function of masonry in modern architectural structures*. New York: Record & Guide Press, 1896–1904.
- Guastavino Moreno, Rafael. *Función de la mampostería en las modernas construcciones arquitectónicas. 1. Prolegó-*

- menos a las funciones de la mampostería en las modernas construcciones arquitectónicas. 2. Funciones de la mampostería en las modernas construcciones arquitectónicas. S.I., s.n., s.a.
- Gulli, R. «Le volte in folio portanti: Tecnica costruttiva ed impiego nell'edilizia storica e moderna». En *Atti del I Convegno Nazionale Manutenzione e Recupero nella Città Storica*, ARCO, 595B604. Roma: 1993.
- Gulli, R. 1993. «Il sistema tabicado. Una tecnica tradizionale per il recupero». En *Atti del Convegno Internazionale: Il recupero degli edifici antichi, manualistica e nuove tecnologie*, 198B208. Napoli.
- Gulli, R. 1994. «Una ipotesi di intervento conservativo per il recupero delle volte in folio portanti». En *Atti del Convegno di Studi: La ricerca del recupero edilizio*, Ancona, 51B62. Bolonia.
- Gulli, R. y G. Mochi. 1995. *Bóvedas tabicadas: Architettura e costruzione*. Roma: CDP Editrice.
- Heyman, Jacques. 1977. *Equilibrium of shell structures*. Oxford: Oxford University Press.
- Heyman, Jacques. 1982. *The masonry arch*. Chichester: Ellis Horwood.
- Heyman, Jacques. 1995. *Teoría, historia y restauración de estructuras de fábrica. Colección de ensayos*. ed. por S. Huerta. Madrid: Instituto Juan de Herrera.
- Heyman, Jacques. 1999. *El esqueleto de piedra. Mecánica de la arquitectura de fábrica*. Madrid: Instituto Juan de Herrera / CEHOPU.
- Heyman, Jacques. 2001. *La ciencia de las estructuras*. Madrid: Instituto Juan de Herrera.
- Huerta Fernández, Santiago. 1990. *Diseño estructural de arcos, bóvedas y cúpulas en España, ca. 1500-ca. 1800*. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Arquitectura.
- Huerta Fernández, Santiago. 1996. «La teoría del arco de fábrica: desarrollo histórico». *Obra Pública*, NE 38: 18-29.
- Huerta Fernández, Santiago. 1999. «The medieval 'scientia' of structures: the rules of Rodrigo Gil de Hontañón». *Omaggio a Edoardo Benvenuto, Genova 29-30 November, 1 December 1999*.
- Huerta Fernández, Santiago. 2001. «Mechanics of masonry vaults: the equilibrium approach». *Structural analysis of historical constructions III. Possibilities of numerical and experimental techniques*. P. B. Lourenço y P. Roca, eds. Barcelona: CIMNE (en prensa; previsto nov. 2001)).
- Koestler, Arthur. 1964. *The act of creation*. New York. Macmillan.
- Lanza, Gaetano. 1891. *Applied mechanics*. New York: John Wiley and Sons. (1a. ed. 1885)
- Lemma, Massimo. 1996. *Dei tetti ammattonati. Nuova edizione critica del trattato scritto da Felix François d'Espie (1754)*. Venezia: Il Cardo.
- Lemmonier, M. Henry. 1920. *Procès-verbaux de l'Académie Royale d'Architecture, 1671-1793. Tome VI: 1744-1758*. Paris: Édouard Champion.
- Marías, Fernando. 1991. «Piedra y ladrillo en la arquitectura española del siglo XVI.» *Les chantiers de la Renaissance*, J. Guillaume (ed.). París: Picard: 71-83.
- Martorell, Jerónimo. 1910. «Estructuras de ladrillo y hierro atirantado en la arquitectura catalana moderna». *Anuario de la Asociación de Arquitectos de Cataluña*: 119-146.
- Moya Blanco, Luis. 1957. *Bóvedas Tabicadas*. Madrid: Ministerio de la Gobernación. Dirección General de Arquitectura (reimpr. facs. Madrid: C. O. de Arquitectos, 1993).
- Newlon, Howard (ed.). 1976. *A Selection of Historic American Papers on Concrete, 1876-1926*. Detroit: American Concrete Institute.
- Pereda Bacigalupi, Angel. 1951. *Bóvedas tabicadas. Cálculo y ejemplos resueltos*. Santander: Editorial Cantabria.
- Plo y Camín, Antonio. 1767. *El Arquitecto práctico, civil, militar y Agrimensor, dividido en tres libros... El II [contiene] la practica de hacer, y medir todo genero de Bóvedas y Edificios de Arquitectura...* Madrid: Imprenta de Pantaleón Aznar (reimpr. facs. Valencia: Librería París-Valencia, 1995).
- Rankine, W. J. M. 1858. *A Manual of Applied Mechanics*. London: Charles Griffin.
- Rieger, P. Christino. 1763. *Elementos de toda la arquitectura civil...* Madrid: Joachim Ibarra.
- Rondelet, Jean. 1834-48. *Traité théorique et pratique de l'art de bâtir*. Paris: Chez Firmin Didot (primera ed. París: 1802).
- Rosell, Jaume e Isabel Serra. 1987. «Estudis d'Esteve Terradas sobre la volta de maó de pla». *Cinquanta anys de ciència i tècnica a Catalunya*, Barcelona: Institut d'Estudis Catalans, 23-33.
- Rosenthal, E. E. 1988. *El palacio de Carlos V en Granada*. Madrid: Alianza Forma.
- Rubió i Bellver, Juan. 1913. «Dificultats per a arribar a la síntesis arquitectónica», *Anuario de la Asociación de Arquitectos de Cataluña*: 63B79.
- San Nicolás, Fray Lorenzo de. 1639. *Arte y Uso de Arquitectura. Primera parte*. Madrid: s.i. (reimpr. facs. Madrid: Albatros, 1989)
- Schwedler, J. W. 1866. «Die Konstruktion der Kuppeldächer». *Zeitschrift für Bauwesen*, 16: 7-34, lám. 10-14.
- Sotomayor, Joaquín de. 1776. *Modo de hacer incombustibles los edificios sin aumentar el coste de la construcción. Extractado del que escribió en francés el Conde de Espié*. Madrid: Oficina de Pantaleón Aznar.
- Tomlow, Jos. 1989. *Das Modell. Antoni Gaudis Hängemodell und seine Rekonstruktion. Neue Erkenntnisse zum Entwurf für die Kirche der Colonia Güell*. Stuttgart: Institut für leichte Flächentragwerke. Universität Stuttgart.
- Torroja, Eduardo. 1956. *Razón y ser de los tipos estructurales*. Madrid: Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y del Cemento.
- Tourtay, C. 1885. «Sur l'influence des joints dans la résistance à l'écrasement des maçonneries de pierres de taille». *Annales des Ponts et Chaussées*, 2: 582-592.